



INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ

**TECHNISCHE UNIVERSITÄT CAROLO WILHELMINA
ZU BRAUNSCHWEIG**

Mechanisches Verhalten von HTR-Beton Teil 1: Dauertemperaturversuche

Abschlußbericht

Dr.-Ing. U. Diederichs

März 1986

**Untersuchung im Auftrage der Hochtemperatur-Reaktorbau GmbH,
Mannheim.**

**Gefördert mit Mitteln des Bundesministers für Forschung
und Technologie**

HTR-Betonversuche

- Dauertemperaturversuche -

A b s c h l u ß b e r i c h t

erstattet von

Dr.-Ing. U. Diederichs

März 1986

B I B L I O T H E K
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
D-3300 Braunschweig

Untersuchung im Auftrage der Hochtemperatur-Reaktorbau GmbH, Mannheim.

Bestellung: 649.513.1001.09090.30/200 vom 03.02.1984

<u>Inhaltsverzeichnis</u>	Seite
1. Allgemeines	3
2. Aufgabenstellung	3
3. Experimentelles	5
3.1 Herstellung der Probekörper	5
3.2 Versuchsdurchführung	6
4. Versuchsergebnisse	7
4.1 Vorbemerkung	7
4.2 Festigkeitsverhalten	9
4.2.1 Dauertemperierung bei 70 °C	9
4.2.2 Dauertemperierung bei 120 °C	10
4.2.3 Dauertemperierung bei 200 °C	13
4.2.4 Dauertemperierung bei 300 °C	14
4.3 Elastisches Verhalten	15
4.3.1 Vorbemerkung	15
4.3.2 Dauertemperierung bei 70 °C	18
4.3.3 Dauertemperierung bei 120 °C	19
4.3.4 Dauertemperierung bei 200 °C	20
4.3.5 Dauertemperierung bei 300 °C	22
5. Zusammenfassung	22
6. Schrifttum	27
7. Anhang	28

1. Allgemeines

Mit Schreiben vom 03.02.1984 beauftragte die Firma Hochtemperatur-Reaktorbau GmbH, Mannheim, das Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig mit der Durchführung von Dauertemperaturversuchen an Basalt- und Rheinkiesbeton nach vorgegebener Zusammensetzung (HRB-Spezifikation: PNP - 5131 - CB - GHRA 000 752 vom 29.12.1983).

Zunächst sollte mit der Herstellung und Prüfung der Proben aus Basaltbeton begonnen werden. Die erzielten Ergebnisse wurden bereits in den Zwischenberichten /1/ bzw. /2/ zusammenfassend der Auftraggeberin mitgeteilt.

Die Freigabe zur Herstellung der Proben aus Rheinkiesbeton erfolgte nach telefonischer Vorankündigung am 13.07.1984 mit dem Schreiben TR3-Web/LT vom 20.07.1984. Über die Herstellung der Versuchskörper, den Stand der Versuche mit Rheinkiesbeton und die bis zum Januar 1985 erzielten Versuchsergebnisse wurden ebenfalls Zwischenberichte /3, 4/ erstattet.

Im vorliegenden Abschlußbericht sind alle Versuchsergebnisse zusammengefaßt. Vorangestellt sind dem Bericht aus Übersichtsgründen nochmals die Aufgabenstellung und Angaben über die Durchführung der Versuche.

2. Aufgabenstellung

Ziel der Dauertemperaturversuche, die gemäß o.g. Bestellung, des dazugehörigen Angebots Nr. 180/Di/Schr vom 10.05.1983 des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig und der HRB-Spezifikation PNP - 5131 - CB - GHRA - 000 752 vom 29.12.1983 durchzuführen waren, ist es, die Kenntnisse über den Einfluß langandauernder Lagerung bei hohen Temperaturen auf das Festigkeitsverhalten von Reaktorbeton zu vervollständigen. Die Versuchsergebnisse und Erfahrungen aus den HHT-Vor- bzw. -Zwischenprogrammen, ergänzt durch die vorgenannten Versuche, sollten ein komplettes Bild über das Festigkeitsverhalten der entwickelten Betone (Rheinkiesbeton und Basaltbeton) liefern. Die Versuche waren unabdingbar notwendig, um die grundlegenden Daten für die Behälterbemessung zu ermitteln.

Die Versuche orientieren sich stark an den Temperaturzuständen, wie sie im Bauwerk tatsächlich während des Betriebs bzw. während angenommener Störfälle zu erwarten sind. Den zu erwartenden unterschiedlichen Feuchtezuständen des Betons im Bauwerk wurde dadurch Rechnung getragen, daß die Proben sowohl im versiegelten (kein Feuchtaustausch mit der Umgebung) als auch im unversiegelten Zustand (Austrocknung möglich) temperiert wurden.

Für die Versuche waren Zylinder \varnothing 150/300 mm zu verwenden. Die angestrebten Lagerungsdauern, Temperaturstufen und die jeweilige Anzahl der zu prüfenden Proben sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 1: Versuchsplan für Dauertemperaturversuche

Versuchsdauer	Anzahl der Probekörper für Temperaturen			
	70 °C	120 °C	200 °C	300 °C
1 d	3	3	3	3 [*]
7 d	3	3	3	3 [*]
28 d	3	3	3	-
90 d	3	3	-	-
360 d	3	3	-	-
Anzahl der Probekörper für 1 Betonsorte: 84 für 2 Betonsorten: 168				

* nur unversiegelte Versuche

Die Proben waren mit 5 K/h auf die in Tabelle 1 angegebenen Versuchstemperaturen aufzuheizen. Nach der jeweils in der Tabelle 1 angegebenen Versuchsdauer sollten die Proben dann langsam auf Raumtemperatur abgekühlt werden (Abkühlgeschwindigkeit \leq 5 K/h).

Anschließend sollte jeweils die Festigkeit bestimmt werden. Die Probekörper einschließlich Begleitkörper für Güteprüfungen waren ebenfalls im Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig herzustellen.

Über den Untersuchungsauftrag hinausgehend wurden der E-Modul und der Gewichtsverlust nach erfolgter Temperierung untersucht. Die Kosten hierfür wurden vom Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig getragen.

3. Experimentelles

3.1 Herstellung der Probekörper

Für die Herstellung der Probekörper waren je Betonart drei Termine notwendig, an denen jeweils

- 12 Würfel, 15/15/15 cm³, für Güteprüfungen nach 7, 28, 90 und 360 d,
- 3 Zylinder, \emptyset 15/l = 30 cm, für Güteprüfungen nach 90 d und
- 31 Zylinder, \emptyset 15/l = 30 cm, für Dauertemperaturversuche einschließlich Reservekörper

betoniert wurden.

Die Probekörper aus Basaltbeton wurden an folgenden Terminen betoniert:

- 17.01.1984, Beton-Nr.: 8/84, Bezeichnung der zylindrischen Proben:
A 1 ÷ A 34
- 02.02.1984, Beton-Nr.: 19/84, Bezeichnung der zylindrischen Proben:
A 35 ÷ A 68
- 06.02.1984, Beton-Nr.: 20/84, Bezeichnung der zylindrischen Proben:
A 69 ÷ A 102

Die Betonage der Rheinkiesbetonproben erfolgte jeweils am:

- 23.08.1984, Beton-Nr.: 134/84, Bezeichnung der zylindrischen Proben:
R 1 ÷ R 34
- 25.08.1984, Beton-Nr.: 150/84, Bezeichnung der zylindrischen Proben:
R 35 ÷ R 68
- 08.10.1984, Beton-Nr.: 155/84, Bezeichnung der zylindrischen Proben:
R 103 ÷ R 136

Je Betoniertermin wurden in einem Zwangsmischer mit 350 dm³ Nenninhalt die Mischungen mit je ca. 250 dm³ verdichtetem Frischbeton hergestellt. Die Kies- und Basaltzuschläge des Basaltbetons waren getrocknet, der Sand wurde - wie angeliefert - feucht zugegeben.

Beim Rheinkiesbeton wurde der Sand (0/2 mm) getrocknet und der Rheinkieszuschlag - wie angeliefert - feucht zugegeben. Die Mischzeit betrug jeweils 3 Minuten. Der Verzögerer wurde mit dem Zugabewasser zugegeben. Nach der Fließmittelzugabe wurde der Beton weitere 3 Minuten gemischt. Je Mischung wurde vor Fließmittelzugabe das Ausbreitmaß und das Verdichtungsmaß und nach der Fließmittelzugabe das Ausbreitmaß, das Verdichtungsmaß, die Rohdichte und der LP-Gehalt gemessen.

Die Würfel und die zylindrischen Probekörper (\varnothing 15 cm, l = 30 cm) wurden in handelsüblichen Kunststoffformen betoniert. Die Verdichtung erfolgte in allen Fällen auf einem Rütteltisch. Die Verdichtungszeit betrug jeweils 60 Sekunden.

Alle Proben wurden nach dem Betonieren bis zum Ausschalen (nach einem Tag) feucht gehalten und nach dem Ausschalen bis zur Durchführung der Güteprüfungen bzw. dem Zeitpunkt des Beginns der Versuchslagerung unter Wasser gelagert.

Nach ausreichender Erhärtung, gewöhnlich im Alter von ca. 28 Tagen, wurden die Zylinder an der Betonieroberseite naß plangeschliffen.

Weitere Einzelheiten zur Herstellung der Probekörper sind in den Zwischenberichten "HTR-Betonversuche - Probekörperherstellung" /1, 3/ zusammengestellt.

3.2 Versuchsdurchführung

Die Proben wurden in Heizöfen bzw. Wärmekammern, die bereits im Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig vorhanden waren, unter versiegelten und unversiegelten Bedingungen aufgeheizt bzw. temperiert. Im Bild 1 ist eine solche Wärmekammer, die für die Temperaturstufen 70 °C, 120 °C und 200 °C ausgelegt worden war, dargestellt. Für die versiegelten Versuche wurden spezielle Versiegelungsgefäße (zul. Innendruck 40 bar, T_{\max} = 250 °C) verwendet (vgl. Bild 2).

Bestimmt wurden jeweils die Restfestigkeit, der E-Modul und der Feuchteverlust der Betonproben nach unterschiedlich langer Temperaturlagerung unter austrocknender und versiegelter Versuchslagerung bei 70 und 120 °C über einen Zeitraum von jeweils 1 d, 7 d, 28 d, 90 d und 350 d. 200 °C-Proben wurden versiegelt und unversiegelt jeweils 1 d, 7 d und 28 d gelagert. Für 300 °C war wegen des hohen Wasserdampfdrucks (86 bar) nur unversiegelte Lagerung über 1 d und 7 d vorgesehen.

Die Aufheizgeschwindigkeit betrug bei allen Versuchen ca. 5 K/h, gemessen auf der Betonoberfläche bzw. auf der Oberfläche der Versiegelungsgefäße. Nach Erreichen der vorgesehenen Endtemperaturen wurden die Proben entsprechend lange auf diesem Temperaturniveau gehalten. Die Abkühlung erfolgte ebenfalls mit ≤ 5 K/h. Die Betontemperaturen wurden während der gesamten Temperierung an repräsentativen Proben gemessen und aufgezeichnet.

Die Bestimmungen der Restfestigkeit, des E-Moduls und des Gewichtsverlusts erfolgte bei den unversiegelten Proben, wegen der Möglichkeit der Wiederaufnahme von Feuchtigkeit, innerhalb eines Tages nach erfolgter Abkühlung auf Raumtemperatur. Die versiegelten Proben wurden innerhalb von maximal drei Tagen nach erfolgter Abkühlung geprüft (dazwischenliegendes Wochenende).

Eine nennenswerte Aufnahme oder Abgabe von Feuchtigkeit wurde in diesem Zeitraum nicht festgestellt.

Die Prüfungen der Festigkeit und des E-Moduls erfolgten in Anlehnung an DIN 1048 Blatt 3. Die Prüfungen erfolgten einheitlich in der 5000 kN-Schenck-Trebel-Prüfmaschine.

4. Versuchsergebnisse

4.1 Vorbemerkung

Die Ergebnisse der Festigkeits- und E-Modulversuche sind in den Tabellen 2 bis 9 sowie in den Bildern 3 bis 11 zusammengestellt. Die Tabellen 2 und 3 enthalten neben den an Zylindern gemessenen Referenzwerten (E-Modul und Festigkeit nach 90tägiger Wasserlagerung) auch zu Vergleichszwecken die entsprechenden Würfel Festigkeiten (vgl. auch /1/ und /3/). Außerdem wurden -

über den auftragsgemäßen Versuchsumfang hinausgehend - für einige Betonserien die Würfelfestigkeiten nach längerer Lagerungsdauer bestimmt, um Anhaltspunkte über die weitere Festigkeitsentwicklung zu erhalten.

Die Prozentangaben bei den Festigkeiten und E-Moduln beziehen sich jeweils auf die Mittelwerte der Festigkeiten bzw. E-Moduln, die an den Probezylindern aus der gleichen Betoniercharge nach 90tägiger Wasserlagerung ermittelt wurden (Güteprüfungen).

So ist beispielsweise der mit den Proben A 9, A 14 und A 33 gemessene Mittelwert der Festigkeiten bzw. der E-Moduln der Bezugswert für alle Proben A 1 bis A 34, der Mittelwert der Proben A 36, A 37 und A 38 der Bezugswert für die Proben A 35 bis A 68 usw.

Die Gewichtsveränderungen der Proben während der Temperierung können den Tabellen 10 bis 15 entnommen werden. Der Gewichtsverlust in g bzw. in % wurde wie folgt berechnet:

$$\text{Gewichtsverlust in g} = \text{Ausgangsgewicht} - \text{Gewicht nach Temperierung} \quad (1)$$

$$\text{Gewichtsverlust in \%} = \frac{\text{Gewichtsverlust in g}}{\text{Ausgangsgewicht in g}} \quad (2)$$

Ein negativer Gewichtsverlust bedeutet also Gewichtszunahme im Verlaufe der Temperierung.

Bei den Betonproben der ersten Betoniercharge (Proben A 1 - A 34) wurde versucht, den Gewichtsverlust durch alleinige Bestimmung der Gewichte nach Versuchsende und Subtraktion vom gemittelten Referenzgewicht (vgl. Tabelle 10 und 11) zu bestimmen. Dieses Verfahren erwies sich jedoch als nicht genau genug, insbesondere bei kleinen Gewichtsverlusten. Bei den Proben der Betonierchargen 2 und 3 (Proben A 35 bis A 102) sowie bei den Rheinkiesbetonproben wurden daher die Probengewichte immer unmittelbar vor und nach der Versuchslagerung bestimmt.

Aus Gründen der besseren Übersicht und Vergleichbarkeit wurden die Versuchsergebnisse aus den Tabellen ebenfalls graphisch in den Diagrammen 3 bis 11 wiedergegeben. Dargestellt sind jeweils die Mittelwerte (in den Tabellen mit \bar{x} bezeichnet), bezogen auf die Mittelwerte der Festigkeiten bzw. E-Moduln,

die an den Probezylindern aus der gleichen Betoniercharge nach 90tägiger Wasserlagerung ermittelt wurden. Die in den Bildern 3 bis 6 zusätzlich angegebenen mittleren Zylinderdruckfestigkeiten \overline{f}_C geben dagegen zur Orientierung die aus den drei unterschiedlichen Betonierserien des Basalt- bzw. des Rheinkiesbetons gemittelten Referenzfestigkeiten wieder.

4.2 Festigkeitsverhalten

4.2.1 Dauertemperierung bei 70 °C

Beim Basaltbeton steigt die Festigkeit sowohl bei unversiegelter Lagerung (vgl. Bild 3) als auch bei versiegelter Lagerung (vgl. Bild 4) bis zu Temperierungsdauern von 28 Tagen an. Ein ähnliches Verhalten ist auch beim Rheinkiesbeton zu beobachten (vgl. Bilder 5 und 6).

Nach 90tägiger Lagerungsdauer sinkt die Festigkeit des Basaltbetons etwas ab, wobei die Werte der unversiegelten Proben leicht unterhalb der Referenzwerte liegen, während die versiegelten Proben, bezogen auf den Ausgangszustand, noch eine ca. 10 % höhere Festigkeit aufweisen. Nach einer Lagerungsdauer von einem Jahr verändert sich die Festigkeit der versiegelten Proben kaum noch gegenüber der 90tägigen Lagerung. Die Festigkeit der unversiegelten Proben zeigt dagegen einen leichten Wiederanstieg.

Die Rheinkiesbetonproben zeigen nach 90tägiger unversiegelter Lagerung noch Festigkeiten, die um ca. 8 % über den Ausgangswerten liegen, jedoch sinkt die Festigkeit im Verlauf der einjährigen Lagerung auf Werte knapp unterhalb der Ausgangsfestigkeit.

Bei versiegelter Lagerung zeigen die Rheinkiesbetonproben auch nach 90tägiger Lagerung mit zunehmender Lagerungsdauer noch eine weitere Festigkeitserhöhung.

Für den Festigkeitsanstieg der unversiegelten Proben bei kurzen Temperierungsdauern ist vermutlich die Nachhydratation im anfangs noch feuchten Kernbereich verantwortlich. Außerdem ist eine Aufhärtung der Zementsteinmatrix infolge fortschreitender Austrocknung zu erwarten /5/. Diesen beiden festigkeitssteigernden Phänomenen dürfte sich die austrocknungsbedingte Mikrorißbildung als festigkeitsmindernde Reaktion überlagern. Diese Reaktion kann jedoch auf-

grund des relativ niedrigen Temperaturniveaus von 70 °C und des sehr dichten Betons erst nach sehr langen Temperierungsdauern die festigkeitssteigernden Reaktionen überkompensieren.

Bei den versiegelten Proben dürften demgegenüber vor allem die Nachhydratation bei erhöhten Temperaturen sowie Phasenneubildungen für den Festigkeitsanstieg verantwortlich sein /6/. Diese Vermutung wird auch durch die gemachte Beobachtung gestützt, daß der Festigkeitsanstieg beim Rheinkiesbeton, deren Zuschläge chemisch gesehen überwiegend aus Kieselsäure bestehen, besonders ausgeprägt ist.

4.2.2 Dauertemperierung bei 120 °C

Die Dauertemperierung bei 120 °C unter unversiegelten Bedingungen führt beim Basaltbeton nach eintägiger Lagerungsdauer zunächst zu einer Festigkeitsminderung. Verursacht wird dies vermutlich durch stärkere Gefügespannungen zwischen den Basaltzuschlägen und der Zementstein- bzw. Feinmörtelmatrix aufgrund der geringeren thermischen Ausdehnung des Basaltzuschlags gegenüber der von Zementstein- bzw. der Feinmörtelmatrix. Rheinkieszuschläge besitzen fast den gleichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten wie feuchter Zementstein, so daß Gefügespannungen anfangs sehr gering sind und die festigkeitssteigernden Effekte wie Nachhydratation und hydrothermale Phasenneubildungen im anfangs noch feuchten Kernbereich der Proben überwiegen.

Im Verlauf der weiteren unversiegelten Lagerung trocknen die Proben immer stärker aus, und die Festigkeiten nehmen im Zuge der austrocknungsbedingten Mikrorißbildung ab. Diese Effekte treten gegenüber der 70 °C-Lagerung beschleunigt auf und scheinen nach etwa 28- bis 90tägiger Temperierung abgeschlossen zu sein. Dann verändern sich die Festigkeiten kaum noch.

Insgesamt sind sowohl die festigkeitsmindernden als auch die festigkeitssteigernden Effekte bei 120 °C Dauertemperierung gering. So liegen die Festigkeiten des Basaltbetons und des Rheinkiesbetons in Abhängigkeit von der Temperierungsdauer in einem vergleichsweise engen Band (Basaltbeton: + 2,6 % bis - 9,2 %; Rheinkiesbeton: + 9,2 % bis + 3,1 %; vgl. Tabelle 5 und 8). Nach längeren Temperierungsdauern unterscheiden sich die Festigkeitswerte kaum von den Ausgangsfestigkeiten (Basaltbeton: - 7 %; Rheinkiesbeton + 3 %).

Bei versiegelter Lagerung zeigt der Basaltbeton nach eintägiger Lagerung einen gravierenden Festigkeitsabfall auf 72,4 % des Ausgangswertes bzw. auf 55 N/mm². Bei andauernder hydrothermalen Lagerung tritt zunächst eine Festigkeitserholung und schließlich nach einjähriger Lagerung eine starke Festigkeitserhöhung auf 100 N/mm² auf. Beim Rheinkiesbeton sind nach ein- bzw. siebentägiger Temperierung ebenfalls geringe Festigkeitsabnahmen zu beobachten. Sie sind im Vergleich zum Basaltbeton jedoch vernachlässigbar, denn der Rückgang beträgt nur 2 bis 3 %.

Nach 28tägiger Temperierung hat der Basaltbeton seine Ausgangsfestigkeit wiedererlangt, und nach 90 Tagen überschreitet er sie um 8,5 %. Etwas überraschend ist die hohe Festigkeitszunahme nach einjähriger Lagerung, denn nach früher gemachten Erfahrungen [7] sollten die hydrothermalen Reaktionen eigentlich schon nach etwa 30 bis 90 Tagen abgeschlossen sein.

Der Rheinkiesbeton zeigt eher das erwartete Verhalten: Nach 28tägiger Temperierung ist ein Festigkeitsanstieg auf 124,7 % des Ausgangswertes zu beobachten, und nach 90 Tagen beträgt die Festigkeit 132,8 % bzw. 85 N/mm². Die weiter andauernde Temperierung ruft keine weitere Festigkeitssteigerung mehr hervor.

Als Hauptursache für den starken Festigkeitsabfall des Basaltbetons nach eintägiger Temperierung ist wahrscheinlich die Mikrorißbildung aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnung des Basaltzuschlags und des Zementsteins bzw. der Feinmörtelmatrix anzusehen. Zusätzlich dürften sich gewisse Abminderungen der Betonfestigkeit daraus ergeben, daß die Zementsteinmatrix zu Beginn der hydrothermalen Lagerung ebenfalls eine Festigkeitsabminderung durch Umlagerungen des Zwischenschichtwassers und durch Aufweitung der Gelstruktur erfährt. Das Auftreten dieser Reaktionen ist sehr wahrscheinlich auch der Grund dafür, daß der Rheinkiesbeton nach eintägiger Lagerung zunächst an Festigkeit verliert.

Erst nach einiger Zeit wird die Festigkeitsabminderung durch die Nachhydratation und durch hydrothermale Phasenneubildung überkompensiert; insbesondere können auch die Mikrorisse im Basaltbeton durch die neuentstandenen Reaktionsprodukte überbrückt und verschlossen werden, so daß die Festigkeiten mit andauernder Lagerung wieder ansteigen.

Die Festigkeitsminderungen nach kurzzeitiger versiegelter Lagerung sind bei beiden Betonen auch deshalb vergleichsweise stark ausgeprägt, weil durch die Versiegelung kein austrocknungsbedingtes Verfestigen der Zementgelstruktur wie bei den unversiegelten Proben auftreten kann.

Die bei kurzen Temperierungsdauern beobachtete stärkere Festigkeitsabnahme bei den 120 °C-gelagerten Proben als bei den 70 °C-gelagerten Proben beruht vor allem darauf, daß die Mikrorißbildung bei 120 °C stärker ist, weil sich die Dehnungsdifferenzen stärker bemerkbar machen und weil sich die entfestigenden Reaktionen der Gelaufweitung und Wasserumstrukturierung ebenfalls stärker auswirken als bei 70 °C.

Bei den versiegelten Rheinkiesbetonproben weichen die Proben R 55 und R 113 von dem Verhalten der übrigen, gleichartig behandelten Proben deutlich ab. Ursache dafür ist, daß die Proben infolge von Undichtigkeiten der Versiegelungsbehälter teilweise austrocknen konnten (vgl. Tabelle 14). Der Gewichtsverlust von Probe R 55 liegt bei 3,66 % und ist vergleichbar mit unversiegelten Proben, die etwa sieben Tage temperiert wurden. Die Festigkeit von R 55 liegt jedoch deutlich unterhalb der der unversiegelten Proben.

Ähnliche Verhältnisse sind bei der Probe R 113 zu beobachten: Der Gewichtsverlust ist vergleichbar mit dem Gewichtsverlust unversiegelter Proben, die etwa 28 Tage temperiert worden waren; die Festigkeit von R 113 liegt ebenfalls unterhalb der Festigkeit der unversiegelten Proben, allerdings nur knapp.

Diese zufällig erhaltenen Ergebnisse machen bereits deutlich, daß die festigkeitssteigernden hydrothermalen Reaktionen im allgemeinen nur dann vollständig ablaufen können, wenn ausreichend Feuchtigkeit vorhanden ist. Für unvollständige Versiegelung - Verhältnisse, wie sie im realen Bauwerk insbesondere in Übergangszonen zu erwarten sind - kann die Festigkeitsentwicklung aus den vorliegenden Untersuchungsergebnissen nicht ohne weiteres vorhergesagt werden. Hier sollten noch weitere orientierende Versuche angeschlossen werden.

4.2.3 Dauertemperierung bei 200 °C

Die 200 °C-Dauertemperierung unversiegelter Proben führt beim Basaltbeton innerhalb eines Tages zu einem vernachlässigbar geringen Festigkeitsverlust, der durch 7tägige Lagerung noch etwas erhöht wird. Eine weitere Temperierung scheint jedoch keinen weiteren Festigkeitsverlust mehr nach sich zu ziehen.

Beim Rheinkiesbeton sind die Verhältnisse ähnlich; jedoch ist nach eintägiger Temperierung zunächst noch ein geringer Festigkeitszuwachs zu registrieren, der im Verlauf der weiteren Temperierung wieder abgebaut wird. Nach siebentägiger Lagerung ist kein weiteres nennenswertes Absinken der Festigkeit mehr zu beobachten.

Gegenüber den bei 120 °C unversiegelt temperierten Proben sind die Festigkeiten der bei 200 °C temperierten Proben nur leicht - im Mittel um ca. 5 % - herabgemindert. Die Phänomene, die für die Entwicklung der Festigkeit bei 200 °C-Temperierung maßgebend sind, dürften im wesentlichen die gleichen sein wie die bei der 120 °C-Temperierung, jedoch läuft die Austrocknung bei der höheren Temperatur deutlich schneller ab, und der Endzustand wird schneller erreicht.

Die versiegelte eintägige Lagerung bei 200 °C ruft beim Basaltbeton einen ähnlichen Festigkeitsverlust hervor wie nach eintägiger Lagerung bei 120 °C. Danach setzt - wie schon bei den 120 °C-Versuchen - eine deutliche Festigkeitserhöhung ein. Nach sieben Tagen hat der Basaltbeton seine Ausgangsfestigkeit wiedererreicht. Nach 28 Tagen wird die Ausgangsfestigkeit um ca. 35 % übertroffen. Dieser in Bild 5 angegebene Wert ist jedoch nicht sehr zuverlässig, da er nur an einer Probe gemessen wurde (vgl. Tabelle 6).

Beim Rheinkiesbeton beobachtet man dagegen bereits nach eintägiger versiegelter 200 °C-Lagerung einen deutlichen Festigkeitsanstieg, der im Verlauf der weiteren Lagerung noch zunimmt. Auch beim Rheinkiesbeton beruht der in Bild 6 angegebene 28-Tage-Wert nur auf einer Einzelmessung (vgl. Tabelle 9), denn sowohl beim Rheinkiesbeton als auch beim Basalt trocknete ein Teil der Proben infolge Undichtigkeit der Versiegelungsgefäße aus (vgl. auch Tabelle 12 und 15).

Die Austrocknung wirkt sich verschiedenartig auf die Festigkeitsentwicklung aus: Beim Rheinkiesbeton ist bei den ausgetrockneten Proben eine Festigkeitssteigerung auf 165 % ($\approx 101 \text{ N/mm}^2$) festzustellen. Diese Festigkeit liegt deutlich über der Festigkeit der ständig feucht gehaltenen Probe, die nur eine Festigkeit von 77 N/mm^2 aufweist. Offenbar ist der Wasserverlust bei den Proben R 24 und R 27 erst eingetreten, nachdem die festigkeitssteigernden hydrothermalen Reaktionen bereits vollständig abgeschlossen waren, so daß durch die anschließende Austrocknung des Zementsteins eine weitere Verfestigung eintreten konnte.

Beim Basaltbeton sind, wie der Gewichtsverlust in Tabelle 12 anzeigt, alle Proben ausgetrocknet, jedoch offenbar zu verschiedenen Zeitpunkten. Die Trocknung der Probe A 76 scheint erst nach Abschluß der festigkeitssteigernden hydrothermalen Reaktionen erfolgt zu sein, während bei den Proben A 71 und A 87 der Feuchtigkeitsverlust bereits so früh eingesetzt haben muß, daß die hydrothermalen Reaktionen nicht im vollen Umfang ablaufen konnten.

Da im Bauwerk mit ähnlichen Verhältnissen zu rechnen ist, d.h. zunächst Vorhandensein von gesättigter Wasserdampfatosphäre und anschließende Austrocknung durch Wasserdampftransport und -kondensation in kälteren Bereichen, sollte dieser Aspekt in weiteren Experimenten noch näher untersucht werden, um zu gesicherten Erkenntnissen zum Festigkeitsverhalten unter realen Bauwerksbedingungen zu gelangen.

4.2.4 Dauertemperierung bei 300 °C

Die Dauertemperierung bei 300 °C erfolgte aufgrund des hohen Dampfdrucks (86 bar) nur unter unversiegelten Bedingungen. Auch war wegen der hohen Temperaturen zu erwarten, daß die festigkeitsmindernden Reaktionen - im wesentlichen austrocknungsbedingte Rißbildung - im Vergleich zu den niedrigeren Temperaturen in wesentlich kürzerer Zeit abgeschlossen werden.

In der Tat ist auch nur eine geringe Tendenz festzustellen, daß die Festigkeit nach eintägiger Temperierung im Verlaufe weiterer Temperierung noch abnimmt. Beim Basaltbeton beträgt die weitere Abnahme der Festigkeit nur 1,4 %. Beim Rheinkiesbeton ist diese Differenz der Festigkeit zwischen eintägiger und siebentägiger Temperierung ebenfalls gering (6,5 %).

Sowohl beim Rheinkiesbeton als auch beim Basaltbeton beträgt die Abnahme der Festigkeit nach siebentägiger 300 °C-Temperierung ca. 20 %. Der Rheinkiesbeton besitzt dann noch eine Festigkeit von 48 N/mm², und beim Basaltbeton beträgt sie 60 N/mm².

Das günstigere Verhalten des Basaltbetons beruht offensichtlich darauf, daß die Differenzen zwischen den thermischen Dehnungen des Basaltzuschlags und des Zementsteins im Temperaturbereich oberhalb 200 °C kleiner sind als die entsprechenden Differenzen zwischen Rheinkieszuschlag und Zementstein. Dadurch wird auch die festigkeitsmindernde Mikrorißbildung im Basaltbeton in geringerem Maße auftreten als im Rheinkiesbeton. Zusätzlich dürfte sich die bessere Verzahnung der gebrochenen Basaltzuschläge mit der Matrix positiv auf die Festigkeit nach 300 °C-Temperierung auswirken.

4.3 Elastisches Verhalten

4.3.1 Vorbemerkung

Der E-Modul wurde, wie bereits erwähnt, in Anlehnung an DIN 1048 Blatt 3 ermittelt; d.h. die Proben wurden zunächst mit der Unterlast $F_U = 10$ kN in die Prüfmaschine eingebaut, dann wurde das induktive Verformungsmeßsystem (zwei auf der Mantelfläche gegenüberliegende Meßaufnehmer, Meßlänge = 200 mm) aufgesetzt, und es erfolgte die Belastung der Proben mit einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit $v_b = 0,5$ N/mm² pro Sekunde auf 1/3 der erwarteten Bruchkraft F_0 . Anschließend erfolgte die Entlastung bis zur Unterlast F_U mit der gleichen Geschwindigkeit v_b . Diese Belastungszyklen wurden insgesamt elfmal wiederholt. Die Spannungs-Dehnungs-Verläufe der 1. und 11. Be- und Entlastung wurden jeweils registriert. Der E-Modul wurde aus dem 11. Belastungszweig als Sekante zwischen der Unterlast F_U und der Oberlast F_0 berechnet.

In Bild 7 sind beispielhaft die Spannungs-Dehnungs-Verläufe von Basaltbetonproben, die versiegelt und unversiegelt einer siebentägigen Dauertemperierung unterworfen waren, dargestellt. Zum Vergleich ist der σ - ϵ -Verlauf einer Referenzprobe, die thermisch nicht belastet worden war, mit aufgeführt. Man erkennt, daß sich die σ - ϵ -Kurven der bei 70 °C versiegelt gelagerten Probe kaum von den σ - ϵ -Kurven der Referenzprobe unterscheiden. Im Gegensatz dazu

zeigt die unversiegelt gelagerte 70 °C-Probe bereits eine deutlich stärkere Neigung der σ - ϵ -Kurven. Weiterhin fallen die starke Hysterese zwischen der 1. Belastung und der 1. Entlastung und die große bleibende Verkürzung nach der 1. Entlastung auf. Sie sind viel stärker ausgeprägt als bei der Referenzprobe bzw. der versiegelten Probe.

Bei den bei 120 °C bzw. 200 °C versiegelt temperierten Proben nehmen sowohl die Neigungen der σ - ϵ -Kurven als auch die bleibenden Verkürzungen etwas gegenüber den 70 °C-Proben zu, jedoch ist die Zunahme dieser beiden Größen relativ gering im Vergleich zu den unversiegelt temperierten 120 °C- und 200 °C-Proben. Bei der unversiegelt temperierten 300 °C-Probe ist nochmals eine deutliche Zunahme der bleibenden Verkürzungen und der Hysterese zwischen der ersten Be- und Entlastung festzustellen.

Darüber hinaus weisen alle σ - ϵ -Kurven - insbesondere die der unversiegelt temperierten Proben - sehr starke Nichtlinearitäten auf. Dadurch wird der "E-Modul" sehr stark abhängig von seiner Definition bzw. von der Berechnungsart. Definiert man ihn wie im vorliegenden Fall als Sekantenmodul, wird er wesentlich von den bei der Berechnung herangezogenen Ober- und Unterlasten (F_0 und F_u) bestimmt. Bei der unkritischen Übernahme der E-Moduln für Berechnungen besteht auch die Gefahr, daß insbesondere bei kleinen Spannungsniveaus und hohen Temperaturen bei vorgegebenen Spannungen die tatsächlichen Verformungen um mehr als die Hälfte unterschätzt werden können.

Die starke Abnahme der Elastizität bei den unversiegelten Proben beruht hauptsächlich auf der Austrocknung des Zementsteins bei den hohen Temperaturen. Infolge der Austrocknung schwindet der Zementstein sehr stark, gleichzeitig dehnen sich die Zuschläge während der Aufheizung aus, und es treten Mikrorisse insbesondere in der Kontaktzone zwischen Grobzuschlag und Feinmörtelmatrix auf. Teilweise werden diese Risse schon während der ersten Belastung wieder geschlossen. Dieser Mechanismus ruft die Hysterese zwischen der 1. Belastung und der 1. Entlastung hervor.

Die Nichtlinearität zwischen Spannung und Dehnung beruht darauf, daß infolge der thermischen Inkompatibilität die Zuschläge nach der Temperierung nicht mehr satt von der Zementsteinmatrix eingebettet sind, sondern

teilweise nur noch geringe, punkartige Kontaktflächen zwischen dem Zuschlag und der Feinmörtelmatrix bestehen. Mit zunehmender Belastung werden einerseits immer mehr dieser mikroskopischen Aufstandsflächen aktiviert; andererseits werden die Aufstandsflächen infolge sehr starker Verformungen zunehmend vergrößert, und die Probe reagiert mit ansteigender Belastung immer steifer.

Bei den versiegelt gelagerten Proben sind ebenfalls die Differenzen zwischen den thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Zementsteins und den Zuschlägen verantwortlich für die E-Modulniedrigung. Jedoch sind die "Schwindverkürzungen" des Zementsteins deutlich gegenüber den unversiegelten Proben herabgesetzt, weil bei den versiegelten Proben keine Austrocknung stattfinden kann. Außerdem werden die Strukturvergrößerungen des Zementsteins, die ebenfalls zu einem Abfall des E-Moduls führen können, durch die hydrothermalen Phasenneubildungen teilweise überkompensiert.

Ähnliche Beobachtungen wie bei dem hier diskutierten Basaltbeton wurden auch bei den Untersuchungen des Rheinkiesbetons gemacht. Die entsprechenden Ergebnisse werden gemeinsam mit den Ergebnissen, die mit Basaltbeton erzielt wurden, ausführlich diskutiert. Aus Gründen der besseren Übersichtlichkeit erfolgt die Diskussion ähnlich wie bei den Festigkeitsergebnissen getrennt nach den Lagerungstemperaturen.

Wie bereits erwähnt wurde, ist das elastische Verhalten der unversiegelt temperierten Betone sehr eng mit dem Wassergehalt verknüpft. Deshalb ist in den Bildern 8 und 10, die den E-Modul nach bestimmter Temperierungsdauer über der Lagerungstemperatur in bezogener Form wiedergeben (Bezugswert ist E-Modul von 90 Tage wassergelagerten Proben), auch der jeweils gemessene Feuchtigkeitsverlust dargestellt (vgl. auch Tabellen 10 bis 15). Bei den versiegelt temperierten Proben war bei intakt gebliebener Abdichtung im allgemeinen keine nennenswerte Gewichtsänderung zu verzeichnen; daher sind auch in den Bildern 9 und 11 Gewichtsveränderungen nicht mit angegeben.

4.3.2 Dauertemperierung bei 70 °C

Sowohl beim Basaltbeton (Bild 8) als auch beim Rheinkiesbeton (Bild 10) nimmt der E-Modul der unversiegelt temperierten Proben mit zunehmender Temperierungsdauer ab. Die E-Modulabnahme eines bestimmten Betons korreliert stark mit dem Feuchtigkeitsverlust. Da der Feuchtigkeitsgehalt aufgrund der Transportprozesse monoton mit der Temperierungsdauer abnimmt, nimmt auch der E-Modul im allgemeinen monoton mit der Temperierungsdauer ab. Der Feuchtegehalt des Rheinkiesbetons dürfte nach einjähriger Temperierung seinen Endwert erreicht haben, denn er unterscheidet sich dann kaum noch vom Feuchtigkeitsgehalt der bei 120 °C gelagerten Proben. Auch beim Basaltbeton scheint die Austrocknung nach einjähriger Lagerung im wesentlichen abgeschlossen zu sein.

Aus dem Austrocknungsverlauf über der Temperierungsdauer geht hervor, daß der Rheinkiesbeton bei gleicher Temperierung immer etwas mehr Wasser verliert als der Basaltbeton. Die prozentuale E-Modulabnahme des Basaltbetons liegt jedoch immer deutlich über der des Rheinkiesbetons. Das heißt, für den E-Modulabfall ist nicht allein das austrocknungsbedingte Schwinden des Zementsteins maßgebend. Auch die thermische Ausdehnung der Zuschläge spielt eine wesentliche Rolle, da sich aus dem Dehnungsverhalten der beiden Komponenten die Dehnungsdifferenzen bzw. das Ausmaß der elastizitätserniedrigenden Mikrorißbildung ergibt.

Bei den versiegelt temperierten Proben zeigen nur die Basaltbetonproben einen geringen E-Modulabfall (- 1,7 %). Alle anderen Proben weisen eine leichte Erhöhung des E-Moduls gegenüber der 20 °C-Wasserlagerung auf.

Sowohl beim Basaltbeton als auch beim Rheinkiesbeton tritt nach siebentägiger Lagerung ein bemerkenswerter Anstieg des E-Moduls auf, der im Verlaufe der weiteren Lagerung wieder etwas zurückgeht. Erst nach einjähriger Temperierung erreichen die E-Moduln der beiden Betone ihre höchsten Werte.

Dieses Verhalten bestätigt die in Kap. 4.2.1 geäußerte Vermutung, daß mehrere strukturverändernde Reaktionen (Strukturverfestigung durch Nachhydratation unvollständig erhärteter Zementkörner, Strukturvergrößerung durch hydrothermale Phasenumwandlung des Zementsteins, Gelaufweiteung durch zusätzliche

Wassereinlagerung in die Zwischenschichten und Strukturverdichtungen durch hydrothermale Phasenneubildungen aus SiO_2 und Freikalk) gleichzeitig, jedoch mit unterschiedlicher Geschwindigkeit und Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften ablaufen.

Eine Strukturauflockerung aufgrund von Dehnungsdifferenzen zwischen Zementstein und Zuschlägen scheint bei 70 °C und versiegelter Temperierung von untergeordneter Bedeutung zu sein.

4.3.3 Dauertemperierung bei 120 °C

Ebenso wie bei der unversiegelten Lagerung bei 70 °C nimmt der E-Modul nach unversiegelter Temperierung bei 120 °C bei beiden Betonen (vgl. Bild 8 und 10) mit der Temperierungsdauer ab. Nach einjähriger unversiegelter Lagerung gehen die E-Moduln des Rheinkiesbetons auf 60 % und die des Basaltbetons auf ca. 50 % des jeweiligen Ausgangswertes zurück. Absolut gesehen liegt der E-Modul des Basaltbetons jedoch immer etwas höher als der E-Modul des Rheinkiesbetons.

Auch bei der 120 °C-Temperierung besteht ein enger Zusammenhang zwischen Feuchtigkeitsverlust und E-Modulabnahme. So treten beispielsweise bereits 2/3 des gesamten Feuchtigkeitsverlusts beim Basaltbeton nach eintägiger Lagerung auf. Dementsprechend weist auch der E-Modul den größten Anteil der gesamten nach einjähriger Lagerung zu erwartenden E-Modulabminderung bereits nach eintägiger Lagerung auf.

Beim Rheinkiesbeton verläuft die Entwässerung sehr viel langsamer. Der Feuchtigkeitsverlust erreicht jedoch ungefähr den gleichen Endwert nach einjähriger Temperierung wie beim Basaltbeton. Entsprechend des langsameren Entwässerungsverlaufs verläuft auch die E-Modulabnahme beim Rheinkiesbeton langsamer.

Der nach allen Temperierungsdauern im Vergleich zum Rheinkiesbeton stärkere Abfall des Basaltbeton-E-Moduls kann ebenfalls mit den stärkeren Dehnungsunterschieden zwischen der anfänglich feuchten Feinmörtelmatrix und dem Basaltzuschlag erklärt werden: Durch die dadurch bedingte stärkere Mikro-

rißbildung wird beim Basaltbeton in größerem Umfang Transportraum geschaffen als beim Rheinkiesbeton, und der Wasserdampftransport bzw. die Entfeuchtung läuft im Basaltbeton beschleunigt ab (vgl. /9, 10/).

Die gleichen Mechanismen (stärkere Rißbildung in der Aufheizphase, schnelleres Austrocknen) führen auch dazu, daß die E-Modulminderung beim Basaltbeton schneller und in stärkerem Umfang abläuft als beim Rheinkiesbeton.

Im Vergleich zu der 70 °C-Temperierung laufen die Entwässerungsvorgänge bei 120 °C stark beschleunigt ab, und die Endzustände werden erwartungsgemäß nach sehr viel kürzeren Temperierungszeiten angenommen. Man kann davon ausgehen, daß die jeweiligen Endzustände bereits nach etwa 28 bis 90 Tagen nahezu erreicht sind.

Bei den versiegelt temperierten Proben laufen bei der 120 °C-Temperierung im wesentlichen die gleichen E-Modul-mindernden bzw. -steigernden Reaktionen ab wie bei der 70 °C-Temperierung. Die vergleichsweise starke Abnahme des Basaltbeton-E-Moduls dürfte wiederum auf die stärkeren Dehnungsunterschiede zwischen der Feinmörtelmatrix und dem Basaltzuschlag zurückzuführen sein. Die dadurch verursachten Strukturschädigungen werden zwar durch die hydrothermale Phasenneubildung ausgeheilt, die Proben erreichen jedoch nach längerer hydrothermalen Lagerung bestensfalls ihren Ausgangs-E-Modul wieder.

Beim Rheinkiesbeton sind die Dehnungsdifferenzen zwischen Feinmörtelmatrix und Grobzuschlag geringer als beim Basaltbeton. Insofern führen die Phasenneubildungen zu einer deutlichen Verstärkung der Mikrostruktur und somit zu einer Erhöhung des E-Moduls im Verlauf der hydrothermalen Lagerung.

4.3.4 Dauertemperierung bei 200 °C

Die E-Moduln nach eintägiger unversiegelter Temperierung bei 200 °C unterscheiden sich kaum von den E-Moduln nach einjähriger Lagerung bei 120 °C. Die Ausdehnung der Temperierungsdauer auf sieben Tage führt bei 200 °C dann nur noch zu einer geringen weiteren Abnahme des E-Moduls um 5 bis 6 %. Eine weitere Erhöhung der Lagerungszeit zieht keine weiteren Veränderungen mehr nach sich.

Das Verhalten wird verständlich, wenn man den Feuchtigkeitsverlust im Verlaufe der Temperierung betrachtet: Nach eintägiger 200 °C-Temperierung zeigen sowohl der Basaltbeton als auch der Rheinkiesbeton nur geringfügig höhere Feuchtigkeitsverluste als nach einjähriger 120 °C-Lagerung. Es war daher zu erwarten, daß bei den E-Moduln ebenfalls keine gravierenden Unterschiede nach den genannten unterschiedlichen Temperierungen eintreten.

Die Ausdehnung der Lagerungsdauer führt nur noch zu einem geringen weiteren Feuchtigkeitsverlust, auf dem im wesentlichen auch die weitere E-Modulabnahme beruht.

Festzuhalten bleibt, daß die elastizitätsmindernden Prozesse bereits nach siebentägiger unversiegelter Lagerung bei 200 °C nahezu abgeschlossen sind. Die Mechanismen, die zur Abnahme des E-Moduls führen, scheinen im wesentlichen die gleichen zu sein, wie sie auch bei der 120 °C-Lagerung auftreten.

Bei der versiegelten Lagerung tritt sowohl beim Basaltbeton als auch beim Rheinkiesbeton nach eintägiger Temperierung eine E-Modulabnahme auf. Beim Rheinkiesbeton verstärkt sich diese E-Modulabnahme im Verlauf der weiteren Temperierung noch geringfügig. Beim Basaltbeton tritt demgegenüber eine kräftige Erhöhung des E-Moduls auf.

Die Abnahme des E-Moduls beim Rheinkiesbeton scheint u.a. darauf zurückzuführen sein, daß sich beim Rheinkiesbeton nach Überschreiten von 150 °C ebenfalls Dehnungsdifferenzen zwischen Grobzuschlägen und Feinmörtelmatrix ebenfalls strukturschädigend bemerkbar machen. Diese Strukturschädigungen heilen zwar infolge der hydrothermalen Reaktionen aus, bei der Abkühlung brechen die neu gebildeten Brücken infolge der stärkeren Kontraktion der Grobzuschläge jedoch zum Teil wieder auf.

Beim Basaltbeton sind in der Aufheizphase stärkere Strukturschädigungen als beim Rheinkiesbeton zu erwarten. Sie können im Verlauf der hydrothermalen Lagerung nur teilweise kompensiert werden.

4.3.5 Dauertemperierung bei 300 °C

Bei 300 °C wurde die Dauertemperierung wegen des hohen Sättigungsdampfdrucks nur mit unversiegelten Proben durchgeführt. Die Ergebnisse (vgl. Bild 8 und 10) zeigen, daß der Wasserverlust bei 300 °C-Temperierung nur noch geringfügig gegenüber dem Wasserverlust bei 200 °C Lagerung ansteigt. Demgegenüber weisen die E-Moduln nochmals stärkere Abminderungen auf - insbesondere beim Rheinkiesbeton. Die stärkeren Abminderungen der E-Moduln sind durch weitere Mikrorißbildung zu erklären. Sie ist besonders ausgeprägt beim Rheinkiesbeton, weil sich die Grobzuschläge dieses Betons oberhalb etwa 250 °C progressiv mit der Temperatur ausdehnen /11/.

5. Zusammenfassung

Die vorstehend beschriebenen Dauertemperaturversuche hatten zum Ziel, genaue Kenntnisse über den Einfluß langandauernder Lagerung bei hohen Temperaturen auf das Festigkeitsverhalten der im Verlaufe des HHT-Vor- und Zwischenprogramms entwickelten HTR-Betone zu erlangen.

Die Versuche orientierten sich stark an den Temperaturzuständen, wie sie im Bauwerk tatsächlich während des Betriebs bzw. während angenommener Störfälle zu erwarten sind. Den anzunehmenden unterschiedlichen Feuchtezuständen des Betons im Bauwerk wurde dadurch Rechnung getragen, daß die Proben sowohl im versiegelten als auch im unversiegelten Zustand temperiert wurden.

Für die Versuche wurden Zylinder Ø 150 mm/300 mm verwendet. Bestimmt wurden jeweils die Restfestigkeit, der E-Modul und der Feuchteverlust der Betonproben nach unterschiedlich langer Temperaturlagerung unter austrocknenden und versiegelten Bedingungen bei 70 und 120 °C über einen Zeitraum von jeweils 1 d, 7 d, 28 d, 90 d und 365 d. 200 °C-Proben wurden versiegelt und unversiegelt jeweils 1 d, 7 d und 28 d gelagert. Für 300 °C war wegen des hohen Wasserdampfdrucks (86 bar) nur unversiegelte Lagerung über 1 d und 7 d vorgesehen.

Die Aufheizgeschwindigkeit betrug für alle Versuche ca. 5 K/h, gemessen auf der Betonoberfläche bzw. auf der Oberfläche der Versiegelungsgefäße. Nach Erreichen der vorgesehenen Endtemperaturen wurden die Proben entsprechend lange auf diesem Temperaturniveau gehalten. Die Abkühlung erfolgte ebenfalls mit ≤ 5 K/h. Die Betontemperaturen wurden während der gesamten Temperierung an repräsentativen Proben gemessen und aufgezeichnet. Die Prüfungen der Festigkeit und des E-Moduls erfolgten in Anlehnung an DIN 1048, Blatt 3.

Die Ergebnisse der Dauertemperaturversuche können wie folgt zusammengefaßt werden:

- 70 °C-Versuche:

Bei den unversiegelten Probekörpern ist sowohl beim Rheinkiesbeton als auch beim Basaltbeton im Lagerungszeitraum bis zu einem Jahr im allgemeinen ein leichter Festigkeitsanstieg zu beobachten. Geringe Festigkeitsverluste wurden nur nach 365tägiger Lagerung beim Rheinkiesbeton (ca. - 3 %) und nach 90tägiger Lagerung beim Basaltbeton (ca. - 1 %) festgestellt. Die E-Moduln nehmen bei beiden Betonen mit der Lagerungsdauer auf ca. 60 bis 65 % des Ausgangswertes ab. Die E-Modulabnahme wird im wesentlichen von der Feuchtigkeitsabnahme bestimmt.

Bei versiegelter Lagerung erhöht sich im Verlaufe der Versuchslagerung bei beiden Betonen die Festigkeit. Der Festigkeitszuwachs fällt beim Rheinkiesbeton jedoch deutlich höher aus (ca. + 25 % nach 365 d) als beim Basaltbeton (ca. + 10 % nach 365 d). Der E-Modul des Basaltbetons verändert sich in den ersten 90 Tagen der Lagerung kaum, steigt jedoch nach 365 Tagen um ca. 10 % über den Ausgangswert. Beim Rheinkiesbeton ist zwar bereits nach eintägiger Lagerungsdauer eine E-Modulerhöhung festzustellen; nach 365tägiger Lagerung übersteigt sie jedoch 10 % nicht wesentlich.

- 120 °C-Versuche:

Bei unversiegelter Lagerung zeigen die Rheinkiesbetonproben leichte Festigkeitserhöhungen (max. 9 %), die im Verlaufe der Lagerung jedoch wieder abnehmen. Der Basaltbeton erfährt nach eintägiger Lagerung eine Festigkeitsminderung von ca. 9 %; dann wird die Ausgangsfestigkeit nach sieben-tägiger Lagerung um 3 % überschritten. Nach längerer Lagerungsdauer sta-

bilisieren sich die Festigkeitsverluste auf ca. - 5 %. Der E-Modul nimmt bei beiden Betonen jeweils mit der Lagerungsdauer ab. Auch hier zeigt sich - wie schon bei den 70 °C-gelagerten Proben - ein enger Zusammenhang zwischen Feuchtigkeitsgehalt und E-Modul.

Bei versiegelter Lagerung reduziert sich die Festigkeit des Basaltbetons zunächst sehr stark. Nach eintägiger Lagerung ist ein Festigkeitsabfall auf 72,5 % der Ausgangsfestigkeit zu verzeichnen. Diese Festigkeit liegt jedoch noch deutlich über der angestrebten Nennfestigkeit von 51 N/mm². Im Verlauf der weiteren Lagerung tritt dann eine leichte Festigkeitserhöhung bzw. nach einjähriger Versuchslagerung eine starke Festigkeits-erhöhung auf.

Beim Rheinkiesbeton sind ähnliche Effekte zu beobachten, jedoch ist der Festigkeitsabfall nach ein- und siebentägiger Temperierung bedeutend geringer als beim Basaltbeton.

Der E-Modul des Basaltbetons nimmt ebenso wie die Festigkeit nach eintägiger Lagerungsdauer stark ab. Im Verlaufe weiterer Lagerung steigt er jedoch wieder an. Nach einer Lagerungsdauer von > 28 Tagen wird der Ausgangs-E-Modul nahezu wiedererreicht. Beim Rheinkiesbeton sind ausschließlich Erhöhungen des E-Moduls zu beobachten. Sie liegen in der Größenordnung von 10 %.

- 200 °C-Versuche:

Die Absolutwerte der Festigkeiten und der E-Moduln der unversiegelten Körper aus Rheinkiesbeton liegen deutlich unter den vergleichbaren Werten des Basaltbetons. Dagegen fällt die relative, prozentuale Abnahme der E-Moduln beim Rheinkiesbeton geringer aus als beim Basaltbeton. Eine geringe Festigkeitsabnahme wurde nur nach siebentägiger Hochtemperaturlagerung festgestellt. Nach eintägiger Versuchslagerung zeigte sich sogar eine leichte Festigkeitserhöhung, während nach 28tägiger Lagerung die Ausgangsfestigkeit wieder erlangt wurde.

Die bei 200 °C versiegelt gelagerten Proben aus Rheinkiesbeton zeigen im allgemeinen - absolut gesehen - etwas höhere Festigkeiten als die Proben aus Basaltbeton. Insbesondere tritt der starke Festigkeitsabfall, der sich nach eintägiger Versuchslagerung beim Basaltbeton zeigte, beim Rhein-

kiesbeton nicht auf. Dies ist umso überraschender, da die E-Moduln von Rheinkies- und Basaltbeton nach eintägiger Lagerung praktisch identisch sind. Nach siebentägiger Versuchslagerung stimmen die Absolutwerte der Festigkeiten von Rheinkies- und Basaltbeton wieder nahezu überein, und der E-Modul des Rheinkiesbetons hat fast den entsprechenden Wert des Basaltbetons erreicht. Die Werte nach 28tägiger Versuchslagerung sind nicht ohne weiteres vergleichbar, da offenbar infolge von Undichtigkeiten der Probengefäße ein Teil des Wassers im Verlauf der Hochtemperaturlagerung verdampft ist. Dies führte zu außerordentlich hohen Festigkeitssteigerungen beim Rheinkiesbeton. Da im Bauwerk mit ähnlichen Verhältnissen zu rechnen ist - Abwanderung der Feuchtigkeit infolge des hohen Wasserdampfdrucks aus den heißen Bereichen -, sollte dieser Aspekt noch näher untersucht werden.

- Bei den 300 °C-Lagerungstemperaturen nehmen die Festigkeit und der E-Modul des Rheinkiesbetons prozentual etwas weniger bzw. gleich stark ab wie beim Basaltbeton, die Absolutwerte des Rheinkiesbetons liegen jedoch deutlich unter den Werten des Basaltbetons.

Die Wasserabgabe ist sowohl nach eintägiger als auch nach siebentägiger Lagerung beim Rheinkiesbeton etwas höher als beim Basaltbeton. Offenbar wird bei diesen Temperaturen etwas mehr Wasser aus den Rheinkieszuschlägen ausgetrieben als aus den fast inerten Basaltzuschlägen.

Der zeitliche Verlauf von Festigkeits- und E-Modulabnahme sowie Entwässerung des Rheinkiesbetons nach Lagerung bei 300 °C entspricht im wesentlichen den entsprechenden Verläufen beim Basaltbeton.

Die Versuche haben gezeigt, daß die Festigkeitseigenschaften, insbesondere aber die elastischen Konstanten, sehr stark vom Wassergehalt des Betons abhängen. Bisher wurde bei den versiegelten Versuchen mit Wasserüberschuß gearbeitet. Es sollten aber zur Ergänzung des bisherigen Versuchsprogramms auch Versuche mit sog. "bauwerksfeuchtem" Beton durchgeführt werden (Proben in der Plastikschalung versiegelt über 90 Tage hydratisieren, dann ohne Überschußwasser in den Versiegelungsgefäßen einer Dauertemperaturbeanspruchung unterwerfen).

Außerdem wären zur Erklärung des starken Festigkeitsabfalls des Basaltbetons bei kurzzeitiger, versiegelter Versuchslagerung ergänzende Versuche notwendig (möglicherweise tritt der starke Festigkeitsabfall bei "bauwerksfeuchtem" Beton gar nicht auf).

Des weiteren sollte versuchsmäßig dem Phänomen der starken Festigkeitserhöhung versiegelter Proben, die nach einer gewissen Zeit austrocknen können, nachgegangen werden, weil das Auftreten gerade solcher Feuchtezustände im praktischen Betrieb eines SBB zu erwarten ist.

6. Schrifttum

- /1/ Diederichs, U.: HTR-Betonversuche - Probekörperherstellung, Zwischenbericht zur Untersuchung im Auftrage der HRB GmbH., Mannheim. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Juni, 1984.
- /2/ Diederichs, U.: HTR-Betonversuche - Dauertemperaturversuche, Zwischenbericht zur Untersuchung im Auftrage der HRB GmbH., Mannheim. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Juli, 1984.
- /3/ Diederichs, U.: HTR-Betonversuche - Probekörperherstellung - Rheinkiesbeton, Zwischenbericht zur Untersuchung im Auftrage der HRB GmbH., Mannheim. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Dezember 1984.
- /4/ Diederichs, U.: HTR-Betonversuche - Dauertemperaturversuche, 2. Zwischenbericht zur Untersuchung im Auftrage der HRB GmbH., Mannheim. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Januar 1985.
- /5/ Wittmann, F.H.: Grundlagen eines Modells zur Beschreibung charakteristischer Eigenschaften des Betons. DAFStb, Heft 290, Berlin, 1977.
- /6/ Rostásy, F.S.; Ehm, C.; Hinrichsmeyer, K.; Diederichs, U.: Untersuchungen zum Einfluß hoher Betriebstemperaturen auf den Korrosionsschutz in Betonbauwerken der Energietechnik, Forschungsbericht. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, August, 1985.
- /7/ Schneider, U.; Diederichs, U.: HHT-Betonversuche - Zwischenprogramm: Korrosion, Bericht über eine Untersuchung im Auftrage der HRB GmbH., Mannheim, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Mai, 1981.
- /8/ Seeberger, J.; Kropp, J.; Hilsdorf, H.K.: Festigkeitsverhalten und Strukturänderungen von Beton bei Temperaturbeanspruchung bis 250 °C. DAFStb, Heft 360, Berlin, 1985.
- /9/ Diederichs, U.; Hinrichsmeyer, K.; Schneider, U.: Experimentelle Untersuchung von Transportphänomenen und Porenstrukturen in Beton im Bereich der Verdampfung des Porenwassers (Phasenübergang). Abschlußbericht zur Untersuchung im Auftrages des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, August, 1984.
- /10/ Schneider, U.; Herbst, H.-J.; Diederichs, U.: Permeability and Porosity of Concrete at Elevated Temperature, Proceedings of the 8th International Conference on "Structural Mechanics in Reactor Technology", Brussels (Belgien), 19. - 23. August 1985, Paper H 5/5.

Tabelle 2: Festigkeit und E-Modul nichttemperierter Referenzproben (Basaltbeton)

Proben-Nr.	Temperatur [°C]	Lagerungsdauer [Tage]	Festigkeit [N/mm²]	E-Modul [kN/mm²]	Festigkeit [%]	E-Modul [%]
A 9 A 14 A 33	20 unter Wasser	90	77 76 74 $\bar{x} = 76$	48,8 45,3 45,3 46,5	101,3 100,0 97,4 100,0	104,9 97,4 97,4 100,0
A 36 A 37 A 38	20 unter Wasser	90	76 76 75 $\bar{x} = 76$	46,1 46,7 44,5 45,8	100,0 100,0 98,7 100,0	100,7 102,0 97,2 100,0
A 88 A 94 A 95	20 unter Wasser	90	71 71 71 $\bar{x} = 71$	44,8 42,8 48,6 45,4	100,0 100,0 100,0 100,0	98,7 94,3 107,0 100,0
AW 7*) AW 8*) AS 9*)	20 unter Wasser	59	72 69 74 $\bar{x} = 72$	/	94,7 90,8 97,4 94,7	/
AW 10 AW 11 AW 12	20 unter Wasser	90	75 73 78 $\bar{x} = 75$	-	98,7 96,1 102,6 98,7	-
AW 19 AW 20 AW 21	20 unter Wasser	90	81 79 84 $\bar{x} = 81$	/	106,6 103,9 110,5 106,6	/
AW 22 AW 23 AW 24	20 unter Wasser	792	93 94 92 $\bar{x} = 93$	/	122,3 123,7 121,1 122,4	/
AW 31 AW 32 AW 33	20 unter Wasser	90	73 71 79 $\bar{x} = 74$	/	102,8 100,0 111,3 104,2	/
AW 36 AW 34**) AW 35**)	20 unter Wasser	360 - -	84 - -	- - -	118,3 - -	- - -

*) versehentlich nach 59 d geprüft.

**) Prüfung erfolgte wegen zu geringer 7-Tage-Festigkeit nach 14 Tagen.

Tabelle 3: Festigkeit und E-Modul nichttemperierter Referenzproben
(Rheinkiesbeton)

Proben-Nr.	Temperatur [°C]	Lagerungsdauer [Tage]	Festigkeit [N/mm²]	E-Modul [kN/mm²]	Festigkeit [%]	E-Modul [%]
R 3 R 14 R 25	20 unter Wasser	90	61 61 60	31,6 30,1 32,6	100 100 98,4	100,5 95,7 103,7
			$\bar{x} = 61$	31,4	100	100
R 38 R 44 R 61	20 unter Wasser	105	64 64 66	33,9 34,3 34,7	98,5 98,5 101,5	98,8 100,0 101,2
			$\bar{x} = 65$	34,3	100	100
R 107 R 120 R 133	20 unter Wasser	91	66 62 64	34,3 33,6 31,3	103,1 96,9 100,0	103,7 101,6 94,7
			$\bar{x} = 64$	33,1	100	100
RW 7 RW 8 RW 9	20 unter Wasser	90	65 69 66	/	106,6 113,1 108,2	/
			$\bar{x} = 67$	-	109,3	-
RW 10 RW 11 RW 12	20 unter Wasser	360	67 69 67	/	109,8 113,1 109,8	/
			$\bar{x} = 68$	-	111,5	-
RW 19 RW 20 RW 21	20 unter Wasser	90	71 71 69	/	109,2 109,2 106,2	/
			$\bar{x} = 70$	-	107,7	-
RW 22 RW 23 RW 24	20 unter Wasser	360	74 63 68	/	113,8 96,9 104,6	/
			$\bar{x} = 68$	-	104,6	-
RW 43 RW 44 RW 45	20 unter Wasser	91	66 70 65	/	103,1 109,4 101,6	/
			$\bar{x} = 67$	-	104,7	-
RW 46*) RW 47*) RW 48*)	20 unter Wasser	91	67 68 68	/	104,7 106,3 106,3	/
			$\bar{x} = 68$	-	106,3	-

*) Diese Würfel sollten ursprünglich nach Abschluß 360 d geprüft werden. Die Festigkeiten wurden jedoch versehentlich zusammen mit den Proben R 43 ÷ R 45 nach 91 Tagen bestimmt.

Tabelle 4: Festigkeit und E-Modul nach Temperierung bei 70 °C (Basaltbeton)

Proben-Nr.	Temperatur [°C]	Lagerungsdauer [Tage]	Festigkeit [N/mm²]	E-Modul [kN/mm²]	Festigkeit [%]	E-Modul [%]
A 19 A 20 A 32	70 unver- siegelt	1	79 79 78 $\bar{x} = 79$	37,8 39,6 44,4 40,6	103,9 103,9 102,6 103,9	81,5 85,2 95,5 87,3
A 15 A 17 A 2	70 unver- siegelt	7	82 81 80 $\bar{x} = 81$	35,6 33,2 34,8 34,5	107,9 106,6 105,3 106,6	76,6 71,4 74,8 74,2
A 18 A 21 A 22	70 unver- siegelt	28	83 81 86 $\bar{x} = 83$	33,5 33,4 32,6 33,2	109,2 106,6 113,2 109,2	72,0 71,8 70,1 71,3
A 43 A 44 A 45	70 unver- siegelt	90	76 76 74 $\bar{x} = 75$	27,8 28,8 31,6 29,4	100 100 97,4 98,7	60,7 62,9 69,0 64,2
A 49 A 53 A 55	70 unver- siegelt	360	81 81 78 $\bar{x} = 80$	30,6 30,2 29,8 30,2	106,6 106,6 102,6 105,3	66,8 66,0 65,1 66,0
A 2 A 6 A 3	70 versiegelt	1	80 78 78 $\bar{x} = 79$	43,8 47,3 46,1 45,7	105,3 102,6 102,6 103,9	94,2 101,7 99,1 98,3
A 1 A 12 A 34	70 versiegelt	7	85 83 86 $\bar{x} = 85$	48,2 50,3 46,7 48,4	111,8 109,2 113,2 111,8	103,7 108,2 100,4 104,1
A 7 A 10 A 16	70 versiegelt	28	91 90 90 $\bar{x} = 90$	46,3 46,6 47,1 46,7	119,7 118,7 117,1 118,7	99,6 100,2 101,3 100,4
A 61 A 63 A 67	70 versiegelt	90	82 87 81 $\bar{x} = 83$	47,6 46,5 48,5 47,5	107,9 114,5 106,6 109,2	103,9 101,5 105,9 103,8
A 35 A 40 A 39	70 versiegelt	360	84 80 85 $\bar{x} = 83$	52,0 49,6 51,6 51,1	110,5 105,3 111,8 109,2	113,5 108,3 112,7 111,5

Tabelle 5: Festigkeit und E-Modul nach Temperierung bei 120 °C (Basaltbeton)

Proben-Nr.	Temperatur [°C]	Lagerungsdauer b. Versuchstemperatur [Tage]	Festigkeit [N/mm²]	E-Modul [kN/mm²]	Festigkeit [%]	E-Modul [%]
A 11 A 26 A 30	120 unver- siegelt	1	68 69 69 $\bar{x} = 69$	28,8 28,3 28,2 28,4	89,5 90,8 90,8 90,8	61,9 60,9 60,6 61,1
X 51 A 51 A 57	120 unver- siegelt	7	77 77 80 $\bar{x} = 78$	26,9 26,9 26,9 26,9	101,3 101,3 105,3 102,6	58,7 58,7 58,7 58,7
A 52 A 56 A 58	120 unver- siegelt	28	74 75 72 $\bar{x} = 74$	26,3 25,4 23,5 25,1	97,4 98,7 94,7 97,4	57,4 55,5 51,3 54,7
A 91 A 97 A 59	120 unver- siegelt	90	69 67 69 $\bar{x} = 68$	22,6 23,7 22,1 22,8	97,2 94,4 90,8 94,1	49,8 52,2 48,2 50,1
A 27 A 66 A 90	120 unver- siegelt	365	75 66 66 $\bar{x} = 69$	25,3 22,9 24,3 24,2	98,7 86,9 93,0 92,9	54,4 50,0 53,6 52,7
A 60 A 64 A 68	120 ver- siegelt	1	56 53 57 $\bar{x} = 55$	36,4 37,8 35,9 36,7	73,7 69,7 75,0 72,4	79,5 82,5 78,4 80,1
A 42 A 41 A 47	120 ver- siegelt	7	73 70 66 $\bar{x} = 70$	36,5 38,2 38,1 37,1	96,1 92,1 86,8 92,1	79,7 83,4 83,2 83,4
A 46 A 48 A 50	120 ver- siegelt	28	80 77 81 $\bar{x} = 79$	44,3 43,2 48,4 45,3	105,3 101,3 106,6 103,9	96,7 94,3 105,7 98,9
A 85 A 86	120 ver- siegelt	90	77 76 $\bar{x} = 77$	40,6 44,3 42,5	108,5 107,1 108,5	96,7 97,6 93,5
A 82 A 86	120 ver- siegelt	365	101 99 $\bar{x} = 100$	42,9 41,9 42,4	142,3 139,5 140,9	94,4 92,2 93,3

Tabelle 6: Festigkeit und E-Modul nach Temperierung bei 200 °C und 300 °C
(Basaltbeton)

Proben-Nr.	Temperatur [°C]	Lagerungsdauer b.Versuchstemperatur [Tage]	Festigkeit [N/mm ²]	E-Modul [kN/mm ²]	Festigkeit [%]	E-Modul [%]
A 69 A 77 A 92	200 unver- siegelt	1	70 74 67 $\bar{x} = 70$	21,5 22,5 21,3 21,8	98,6 104,2 94,4 98,6	47,4 49,6 46,9 48,0
A 75 A 81 A 89	200 unver- siegelt	7	62 67 67 $\bar{x} = 65$	18,2 18,9 19,5 18,9	87,3 94,4 94,4 91,5	40,1 41,6 43,0 41,6
A 74 A 83 A 93	200 unver- siegelt	28	68 62 69 $\bar{x} = 66$	18,5 17,4 19,4 18,4	95,8 87,3 97,2 93,0	40,7 38,3 42,7 40,5
A 96 A 98 A 80	200 ver- siegelt	1	50 52 51 $\bar{x} = 51$	25,6 25,2 26,0 25,6	70,4 73,2 71,8 71,8	56,4 55,5 57,3 56,4
A 72 A 79 A 78	200 ver- siegelt	7	74 70 75 $\bar{x} = 73$	29,1 28,5 28,0 28,5	104,2 98,6 105,6 102,8	64,1 62,8 61,7 62,8
A 71 A 76 A 87	200 ver- siegelt	28	56 96 58 $\bar{x} = -$	28,1 34,7 27,7 -	78,9 135,2 81,7 -	61,9 76,4 61,0 -
A 4 A 8 A 24	300 unver- siegelt	1	60 61 61 $\bar{x} = 61$	16,1 16,7 16,7 16,5	78,9 80,3 80,3 80,3	34,6 35,9 35,9 35,5
(1) (2) (3)	300 unver- siegelt	7	60 60 59 $\bar{x} = 60$	14,9 15,2 14,8 15,0	78,9 78,9 77,6 78,9	32,0 32,7 31,8 32,3

Tabelle 7: Festigkeit und E-Modul nach Temperierung bei 70 °C (Rheinkiesbeton)

Proben-Nr.	Temperatur [°C]	Lagerungsdauer b. Versuchstemperatur [Tage]	Festigkeit [N/mm²]	E-Modul [kN/mm²]	Festigkeit [%]	E-Modul [%]
R 45 R 46 R 48	70 unver- siegelt	1	72 70 73 $\bar{x} = 72$	28,1 29,4 29,9 29,1	110,8 107,7 112,3 110,8	82,0 85,7 87,2 84,8
R 134 R 135 R 136	70 unver- siegelt	7	77 72 72 $\bar{x} = 74$	27,3 29,1 27,2 27,9	120,3 112,5 112,5 115,6	82,5 87,9 82,2 84,2
R 50 R 51 R 52	70 unver- siegelt	28	73 70 72 $\bar{x} = 72$	27,1 24,2 26,7 26,0	112,3 107,7 110,8 110,8	79,1 70,6 77,9 75,8
R 108 R 109 R 110	70 unver- siegelt	90	73 66 69 $\bar{x} = 69$	22,5 23,4 22,9 22,9	114,1 103,1 107,8 107,8	68,0 70,7 69,2 69,2
R 111 R 112 R 116	70 unver- siegelt	360	62 62 63 $\bar{x} = 62$	20,8 19,9 20,4 20,10	96,9 96,9 98,4 96,9	60,4 60,1 61,6 60,7
R 39 R 40 R 41	70 versiegelt	1	66 68 71 $\bar{x} = 68$	36,1 33,4 37,1 35,5	101,5 104,6 109,2 104,6	105,2 97,4 108,2 103,5
R 122 R 123 R 124	70 versiegelt	7	70 74 73 $\bar{x} = 72$	36,9 39,0 38,9 38,3	109,4 115,6 114,1 112,5	111,5 117,8 117,5 115,6
R 59 R 62 R 63	70 versiegelt	28	75 78 80 $\bar{x} = 78$	38,1 37,9 37,1 37,7	115,4 120,0 123,1 120,0	111,1 110,5 108,2 109,9
R 64 R 65 R 66	70 versiegelt	90	89 88 90 $\bar{x} = 89$	37,5 38,0 36,6 37,4	136,9 135,4 138,5 136,9	109,4 110,8 106,7 109,1
R 117 R 119 R 118	70 versiegelt	360	83 80 78 $\bar{x} = 80$	38,5 40,3 39,5 39,4	129,7 125,0 121,9 125,0	116,1 121,6 119,1 118,8

Tabelle 8: Festigkeit und E-Modul nach Temperierung bei 120 °C (Rheinkiesbeton)

Proben-Nr.	Temperatur [°C]	Lagerungsdauer b. Versuchstemperatur [Tage]	Festigkeit [N/mm ²]	E-Modul [kN/mm ²]	Festigkeit [%]	E-Modul [%]
R 35 R 36 R 37	120 unver- siegelt	1	70 71 71 $\bar{x} = 71$	28,7 28,8 30,1 29,2	107,7 109,2 109,2 109,2	84,0 84,0 87,8 85,1
R 42 R 43 R 44	120 unver- siegelt	7	72 69 70 $\bar{x} = 70$	26,7 27,2 25,4 26,4	110,8 106,2 107,7 107,7	77,8 79,3 74,1 77,1
R 56 R 57 R 58	120 unver- siegelt	28	70 67 64 $\bar{x} = 67$	23,8 23,4 24,6 23,9	107,7 103,1 98,5 103,1	69,4 68,2 71,7 69,7
R 67 R 68	120 unver- siegelt	90	70 63 $\bar{x} = 67$	20,0 20,7 20,4	107,7 97,0 103,1	58,3 60,4 59,3
R 128 R 127 R 126	120 unver- siegelt	360	66 66 69 $\bar{x} = 67$	21,1 22,1 21,4 21,5	101,6 101,6 106,2 103,1	63,8 66,8 64,7 65,1
R 5 R 16	120 ver- siegelt	1	63 55 - $\bar{x} = 59$	35,4 35,8 - 35,6	103,3 90,2 - 96,7	112,7 114,0 - 113,4
R 131 R 121 R 132	120 ver- siegelt	7	63 64 61 $\bar{x} = 63$	40,7 35,5 40,3 38,8	98,4 100,0 95,3 98,4	123,0 107,3 121,8 117,2
R 53 R 54 R 55	120 ver- siegelt	28	81 80 61 $\bar{x} = 81^{*)}$	38,5 39,4 32,6 39,0 ^{*)}	124,7 123,1 93,9 124,7	112,3 114,9 95,1 113,7
R 113 R 114 R 115	120 ver- siegelt	90	66 ^{**)} 84 86 $\bar{x} = 85$	28,4 ^{**)} 36,7 36,2 36,5	103,1 131,2 134,4 132,8	85,8 110,9 109,4 110,1
R 104 R 105 R 106	120 ver- siegelt	360	78 79 77 $\bar{x} = 78$	39,8 42,1 42,4 41,4	121,8 123,4 120,3 121,8	120,1 127,0 127,9 124,9

Tabelle 9: Festigkeit und E-Modul nach Temperierung bei 200 °C und 300 °C
(Rheinkiesbeton)

Proben-Nr.	Temperatur [°C]	Lagerungsdauer b.Versuchstemperatur [Tage]	Festigkeit [N/mm ²]	E-Modul [kN/mm ²]	Festigkeit [%]	E-Modul [%]
R 6 R 8 R 11	200 unver- siegelt	1	66 62 60 $\bar{x} = 63$	19,8 18,1 18,2 18,7	108,2 101,6 98,4 103,3	63,1 57,6 58,0 59,4
R 17 R 18 R 19	200 unver- siegelt	7	59 57 60 $\bar{x} = 59$	17,2 16,4 17,3 17,0	96,7 93,4 98,4 96,7	54,8 52,2 55,1 54,0
R 28 R 29 R 30	200 unver- siegelt	28	57 66 60 $\bar{x} = 61$	16,4 18,3 16,8 17,2	93,4 108,2 98,4 100	52,2 58,2 53,4 54,6
R 7 R 9 R 10	200 ver- siegelt	1	60 70 76 $\bar{x} = 69$	29,9 29,4 29,1 29,5	98,4 114,8 124,6 113,1	95,2 93,6 92,7 93,9
R 21 R 22 R 23	200 ver- siegelt	7	76 72 74 $\bar{x} = 74$	24,0 28,6 25,4 26,0	124,6 118,0 121,3 121,3	76,4 91,1 80,9 82,8
R 24 R 26 R 27	200 ver- siegelt	28	101 77 100 -	37,1 27,1 36,5 -	165,6 126,2 163,9 -	118,1 86,3 116,2 -
R 1 R 2 R 4	300 unver- siegelt	1	52 51 53 $\bar{x} = 52$	14,3 14,7 14,2 14,4	85,2 83,6 86,9 85,2	45,5 46,8 45,2 45,9
R 12 R 13 R 15	300 unver- siegelt	7	49 48 48 $\bar{x} = 48$	12,6 12,6 12,5 12,6	80,3 78,7 78,7 78,7	40,1 40,1 39,8 40,1
R 31 R 32 R 33	170 ^{*)} ver- siegelt	1	65 65 69 $\bar{x} = 66$	32,2 33,8 36,5 34,2	106,6 106,6 113,1 108,2	102,5 107,6 116,2 108,8

*) Versehentlich falsche Temperatur eingestellt!

Tabelle 10: Gewichtsverlust durch die Temperierung bei 70 °C (Basaltbeton)

Proben-Nr.	Temperatur [°C]	Lagerungs-[Tage]	Ausgangsgewicht [g]	Gewicht nach Versuchslagerung [g]	Gewichtsverlust [g]	Gewichtsverlust [%]
A 19 A 20 A 32	70 unver-siegelt	1	- - -	13 276 13 299 13 396	- - -	- - -
			$\bar{x} = 13\ 454$	13 323,7	130,3	0,97
A 15 A 17 A 2	70 unver-siegelt	7	- - -	13 178 13 227 13 233	- - -	- - -
			$\bar{x} = 13\ 454$	13 212,7	241,3	1,79
A 18 A 21 A 22	70 unver-siegelt	28	- - -	13 149 13 101 13 105	- - -	- - -
			$\bar{x} = 13\ 454$	13 118,3	335,7	2,50
A 43 A 44 A 45	70 unver-siegelt	90	13 490 13 540 13 520	13 008 13 040 13 052	482 500 468	3,57 3,69 3,46
			$\bar{x} = 13\ 516,7$	13 033,3	483,3	3,57
A 49 A 53 A 55	70 unver-siegelt	360	13 480 13 420 13 520	12.833 12.777 12.862	647 643 696	4,80 4,79 5,15
			$\bar{x} = 13\ 473,3$	12.824	649,3	4,82
A 2 A 6 A 3	70 ver-siegelt	1	- - -	13 371 13 424 13 438	- - -	- - -
			$\bar{x} = 13\ 454$	13 411	43	+ 0,3
A 1 A 12 A 34	70 ver-siegelt	7	- - -	13 445 13 423 13 349	- - -	- - -
			$\bar{x} = 13\ 454$	13 405,7	48,3	+ 0,4
A 7 A 10 A 16	70 ver-siegelt	28	- - -	13 523 13 468 13 395	- - -	- - -
			$\bar{x} = 13\ 454$	13 402	- 0,8	- 0,1
A 61 A 63 A 67	70 ver-siegelt	90	13 480 13 550 13 470	13 467 13 534 13 452	13 16 18	0,1 0,1 0,1
			$\bar{x} = 13\ 500$	13 484,3	16	0,1
A 35 A 39 A 40	70 ver-siegelt	360	13 540 13 511 13 400	13 480 13 533 13 411	- 30 - 22 - 11	- 0,3 - 0,2 - 0,1
			$\bar{x} = 13\ 453,7$	13 474,7	- 21	- 0,2

Tabelle 11: Gewichtsverlust durch die Temperierung bei 120 °C (Basaltbeton)

Proben-Nr.	Temperatur [°C]	Lagerungs-dauer [Tage]	Ausgangsgewicht [g]	Gewicht nach Versuchslagerung [g]	Gewichts-verlust [g]	Gewichts-verlust [%]
A 11 A 26 A 30	120 unver-siegelt	1	- - -	13 028 12 924 12 722		
			$\bar{x} = 13\,454$	12 891,3	562,7	4,18
AX 51 A 51 A 57	120 unver-siegelt	7	13 200 13 450 13 440	12 468 12 724 12 727	732 726 713	5,545 5 397 5,305
			$\bar{x} = 13\,363,3$	12 639,7	723	5,42
A 52 A 56 A 58	120 unver-siegelt	28	13 480 13 420 13 280	12 756 12 688 12 548	724 732 732	5,37 5,454 5,512
			$\bar{x} = 13\,393,3$	12 664	729,3	5,45
A 97 A 59 A 91	120 unver-siegelt	90	13 480 13 450 13 470	12 696 12 642 12 657	784 808 813	5,82 6,01 6,04
			$\bar{x} = 13\,466,7$	12 665	801,7	5,95
A 27 A 90 A 66	120 unver-siegelt	365	- 13 500 -	12 728 12 706 12 664	- 794 -	- 5,88 -
			$\bar{x} = 13\,545$	12 699	755	5,61
A 60 A 64 A 68	120 ver-siegelt	1	13 280 13 590 13 460	13 251 13 560 13 425	29 21 35	0,218 0,154 0,26
			$\bar{x} = 13\,443,3$	13 415	28,3	0,21
A 42 A 41 A 47	120 ver-siegelt	7	13 558 13 542 13 515	13 523 13 514 13 467	15 28 48	0,11 0,206 0,355
			$\bar{x} = 13\,538$	13 501,3	37	0,27
A 46 A 48 A 50	120 ver-siegelt	28	13 575 13 461 13 502	13 574 13 450 13 521	1 11 - 19	0,007 0,081 - 0,14
			$\bar{x} = 13\,512,4$	13 515	- 2,6	0,02
A 86 A 85	120 ver-siegelt	90	13 530 13 385	13 400 13 530	130 - 145	+ 0,96 - 1,08
			$\bar{x} = 13\,457,5$	13 465	- 7,5	- 0,06
A 82 A 86	120 ver-siegelt	365	13 478 13 530	13 519 13 571	- 41 - 41	- 0,3 - 0,3
			$\bar{x} = 13\,504$	13 545	- 41	- 0,3

Tabelle 12: Gewichtsverlust durch die Temperierung bei 200 °C und 300 °C (Basaltbeton)

Proben-Nr.	Temperatur [°C]	Lagerungs-dauer [Tage]	Ausgangsgewicht [g]	Gewicht nach Versuchslagerung [g]	Gewichts-verlust [g]	Gewichts-verlust [g]
A 69 A 77 A 92	200 unver-siegelt	1	13 370 13 440 13 470	12 541 12 599 12 609	919 841 861	6,87 6,25 6,39
			$\bar{x} = 13\,426,7$	12 583	907	6,50
A 75 A 81 A 89	200 unver-siegelt	7	13 470 13 480 13 510	12 605 12 599 12 654	865 881 856	6,42 6,53 6,33
			$\bar{x} = 13\,486,7$	12 619,3	867,3	6,42
A 74 A 83 A 93	200 unver-siegelt	28	13 390 13 470 13 450	12 510 12 596 12 584	880 874 866	6,57 6,49 6,44
			$\bar{x} = 13\,436,67$	12 563	873,3	6,50
A 96 A 98 A 80	200 ver-siegelt	1	13 430 13 230 13 455	13 211 13 418 13 420	219 - 188 35	1,63 - 1,42 0,26
			$\bar{x} = 13\,371,7$	13 349,7	22	0,2
A 72 A 79 A 78	200 ver-siegelt	7	13 420 13 440 13 410	13 303 13 328 13 293	117 112 117	0,87 0,83 0,87
			$\bar{x} = 13\,423$	13 308	115,3	0,86
A 71 A 76 A 87	200 ver-siegelt	28	13 440 13 430 13 460	12 629 12 593 12 641	811 837 819	6,08 6,23 6,08
			$\bar{x} = 13\,443,3$	12 621	822,3	6,12
A 4 A 8 A 24	300 unver-siegelt	1		12 565 12 630 12 485		
			$\bar{x} = 13\,454$	12 560	894	6,64
A 5 (1) A 23 (2) A 29 (3)	300 unver-siegelt	7		12 548 12 458 12 554		
			$\bar{x} = 13\,454$	12 520	934	6,94

Tabelle 13: Gewichtsverlust durch die Temperierung bei 70 °C (Rheinkiesbeton)

Proben-Nr.	Temperatur [°C]	Lagerungsdauer b. Versuchstemperatur [Tage]	Ausgangsgewicht [g]	Gewicht n. Vers. Lagerung [g]	Gewichtsverlust [g]	Gew.-verlust [%]
R 45 R 46 R 48	70 unversiegelt	1	12.800 12.780 12.850	12.676 12.658 12.721	124 122 129	1,0 1,0 1,0
			$\bar{x} = 12.810$	12.685	125	1,0
R 134 R 135 R 136	70 unversiegelt	7	12.900 12.900 12.870	12.615 12.622 12.599	285 278 271	2,2 2,2 2,1
			$\bar{x} = 12.890$	12.612	278	2,2
R 50 R 51 R 52	70 unversiegelt	28	12.840 12.800 12.830	12.433 12.384 12.404	407 416 426	3,17 3,25 3,32
			$\bar{x} = 12.823$	12.407	416	3,24
R 108 R 109 R 110	70 unversiegelt	90	12.870 12.900 12.930	12.330 12.363 12.370	540 537 560	4,20 4,16 4,33
			$\bar{x} = 12.900$	12.354	546	4,23
R 111 R 112 R 116	70 unversiegelt	360	12.870 12.920 12.850	12.145 12.200 12.128	725 720 722	5,63 5,57 5,62
			$\bar{x} = 12.880$	12.158	722	5,60
R 39 R 40 R 41	70 versiegelt	1	12.850 12.800 12.840	12.865 12.819 12.845	- 15 - 19 - 5	- 0,1 - 0,1 - 0,04
			$\bar{x} = 12.830$	12.843	- 13	- 0,1
R 122 R 123 R 124	70 versiegelt	7	12.920 12.780 12.820	12.928 12.792 12.826	- 8 - 12 - 6	- 0,1 - 0,1 - 0,1
			$\bar{x} = 12.840$	12.848	- 8	- 0,1
R 59 R 62 R 63	70 versiegelt	28	12.840 12.840 12.840	12.858 12.859 12.851	- 18 - 19 - 11	- 0,1 - 0,1 - 0,1
			$\bar{x} = 12.840$	12.856	- 16	- 0,1
R 64 R 65 R 66	70 versiegelt	90	12.820 12.820 12.800	12.853 12.832 12.834	- 33 - 12 - 34	- 0,3 - 0,1 - 0,3
			12.813	12.840	- 26	- 0,2
R 117 R 119 R 118	70 versiegelt	360	12.780 12.900 12.880	12.811 12.957 12.932	- 31 - 57 - 52	- 0,2 - 0,4 - 0,4
			$\bar{x} = 12.853$	12.900	- 47	- 0,4

Tabelle 14: Gewichtsverlust durch die Temperierung bei 120 °C (Rheinkiesbeton)

Proben-Nr.	Temperatur [°C]	Lagerungsdauer b. Versuchstemperatur [Tage]	Ausgangsgewicht [g]	Gewicht n. Vers.-Lagerung [g]	Gewichtsverlust [g]	Gewichtsverlust [%]
R 35 R 36 R 37	120 unversiegelt	1	12.860 12.860 12.840	12.676 12.676 12.655	184 184 185	1,4 1,4 1,4
			$\bar{x} = 12.853$	12.669	184	1,4
R 42 R 43 R 44	120 unversiegelt	7	12.880 12.880 12.800	12.504 12.476 12.396	376 404 404	2,9 3,1 3,2
			$\bar{x} = 12.853$	12.459	394	3,1
R 56 R 57 R 58	120 unversiegelt	28	12.840 12.860 12.800	12.138 12.158 12.106	702 702 694	5,47 5,46 5,42
			$\bar{x} = 12.833$	12.134	699	5,45
R 67 R 68	120 unversiegelt	90	12.870 12.750	12.135 12.004	735 746	5,71 5,85
			$\bar{x} = 12.810$	12.070	741	5,78
R 128 R 127 R 126	120 unversiegelt	350	12.880 12.920 12.900	12.166 12.212 12.180	714 708 720	5,54 5,48 5,58
			$\bar{x} = 12.900$	12.186	714	5,53
R 5 R 16	120 versiegelt	1	12.800 12.800	12.799 12.815	1 - 15	0,01 - 0,12
			$\bar{x} = 12.800$	12.807	- 7	- 0,06
R 121 R 131 R 132	120 versiegelt	7	12.820 12.880 12.900	12.828 12.894 12.899	- 8 - 14 + 1	- 0,06 - 0,11 0,001
			$\bar{x} = 12.867$	12.874	- 7	- 0,05
R 53 R 54 R 55	120 versiegelt	28	12.880 12.820 12.860	12.891 12.830 12.389	- 11 - 10 471	- 0,09 - 0,08 3,66
) ohne Probe R 55			$\bar{x} = 12.853$	12.861 ^{)}	- 11 ^{*)}	- 0,09 ^{*)}
R 113 R 114 R 115	120 versiegelt	90	12.850 12.820 12.870	12.237 12.841 12.898	613 - 21 - 28	4,77 - 0,16 - 0,22
			$\bar{x} = 12.847$	12.870 ^{*)}	- 25	- 0,19 ^{**)}
R 104 R 105 R 106	120 versiegelt	360	12.840 12.820 12.860	12.863 12.883 12.917	- 23 - 63 - 57	- 0,18 - 0,49 - 0,44
			$\bar{x} = 12.840$	12.888	- 48	- 0,37

Tabelle 15: Gewichtsverlust durch die Temperierung bei 200 °C und 300 °C
(Rheinkiesbeton)

Proben-Nr.	Temperatur [°C]	Lagerungsdauer b. Versuchstemperatur [Tage]	Ausgangsgewicht [g]	Gewicht n. Vers.-Lagerung [g]	Gewichtsverlust [g]	Gewichtsverlust [%]
R 6 R 8 R 11	200 unversiegelt	1	12.800 12.800 12.680	12.023 12.011 11.883	770 789 797	6,07 6,16 6,29
			$\bar{x} = 12.760$	11.972	785	6,17
R 17 R 18 R 19	200 unversiegelt	7	12.780 12.780 12.760	11.967 11.966 11.948	813 814 812	6,36 6,37 6,36
			$\bar{x} = 12.773$	11.960	813	6,36
R 28 R 29 R 30	200 unversiegelt	28	12.770 12.800 12.700	11.956 12.018 11.891	814 782 809	6,37 6,11 6,37
			$\bar{x} = 12.757$	11.955	802	6,28
R 7 R 9 R 10	200 versiegelt	1	12.760 12.730 12.820	12.727 12.726 12.785	- 33 4 35	- 0,26 0,03 0,27
			$\bar{x} = 12.770$	12.746	2	0,01
R 21 R 22 R 23	200 versiegelt	7	12.740 12.740 12.760	12.730 11.968*) 12.788	10 722 - 28	0,08 6,06 - 0,22
			$\bar{x} = 12.747$	12.759	- 9 **)	- 0,07 **)
R 24 R 26 R 27	200 versiegelt	28	12.800 12.730 12.780	12.033 12.771 12.015	767 - 41 765	5,99*** - 0,32*** 5,99***
			$\bar{x} = 12.770$	-	-	-
R 1 R 2 R 4	300 unversiegelt	1	12.780 12.820 12.780	11.943 11.891 11.893	837 929 887	6,55 7,25 6,94
			$\bar{x} = 12.793$	11.909	884	6,91
R 12 R 13 R 15	300 unversiegelt	7	12.780 12.800 12.750	11.872 11.911 11.845	908 889 905	7,10 6,95 7,10
			$\bar{x} = 12.776$	11.885	901	7,05
R 31 R 32 R 33	170 versiegelt	1	12.770 12.710 12.780	12.795 12.714 12.701	- 25 - 4 79	- 0,2 - 0,03 0,62
			$\bar{x} = 12.753$	12.737	17	0,13

*) möglicherweise Ablesefehler

**) ohne Berücksichtigung von Probe R 22

***) läßt auf Undichtigkeit der Versiegelungsgefäße schließen

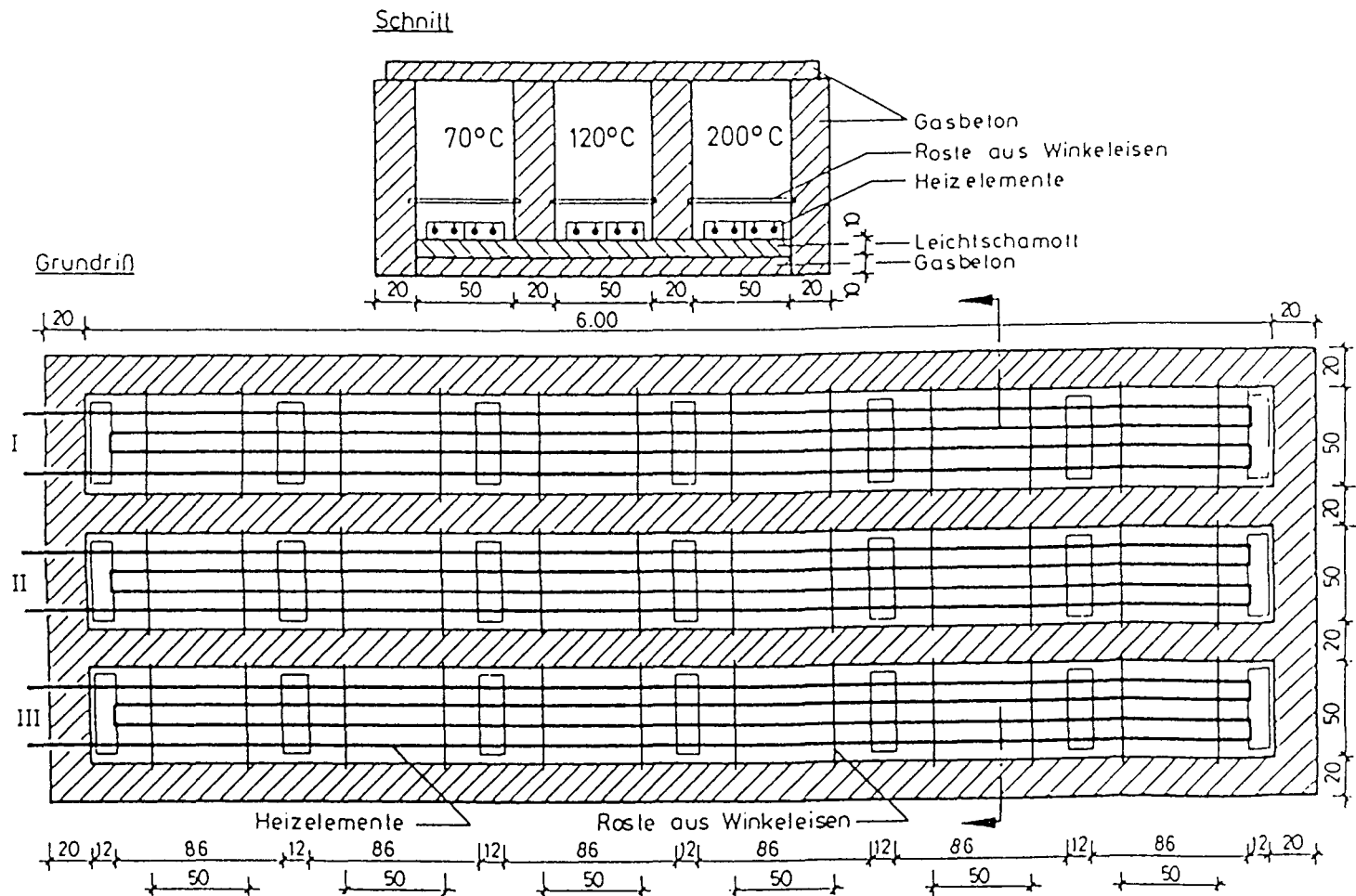


Bild 1: Wärmekammer für Dauertemperaturversuche an HTR-Beton

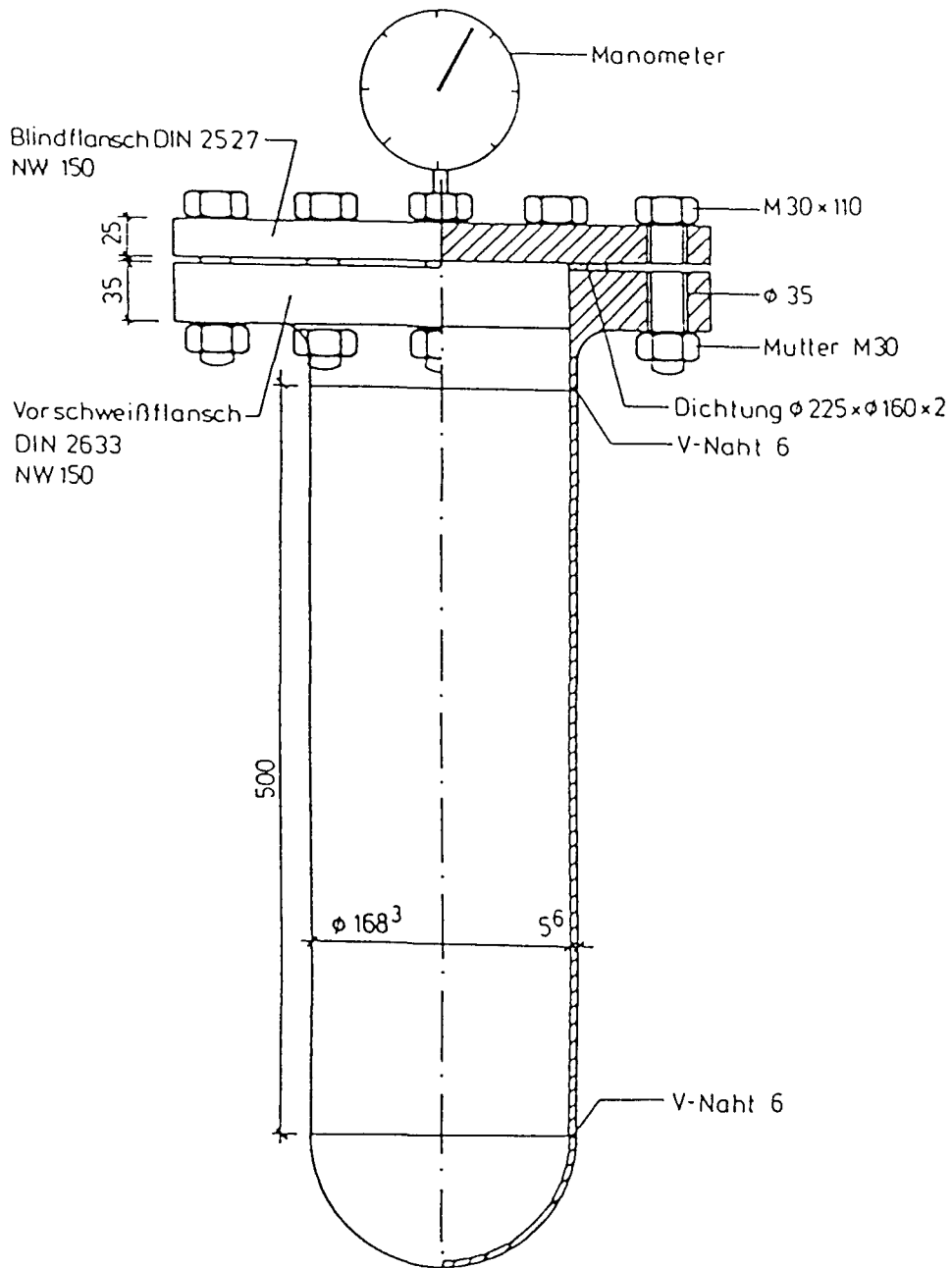


Bild 2: Versiegelungsgefäß für HTR-Dauertemperaturversuche für eine Maximaltemperatur von 250 °C und einem Innendruck von 40 bar

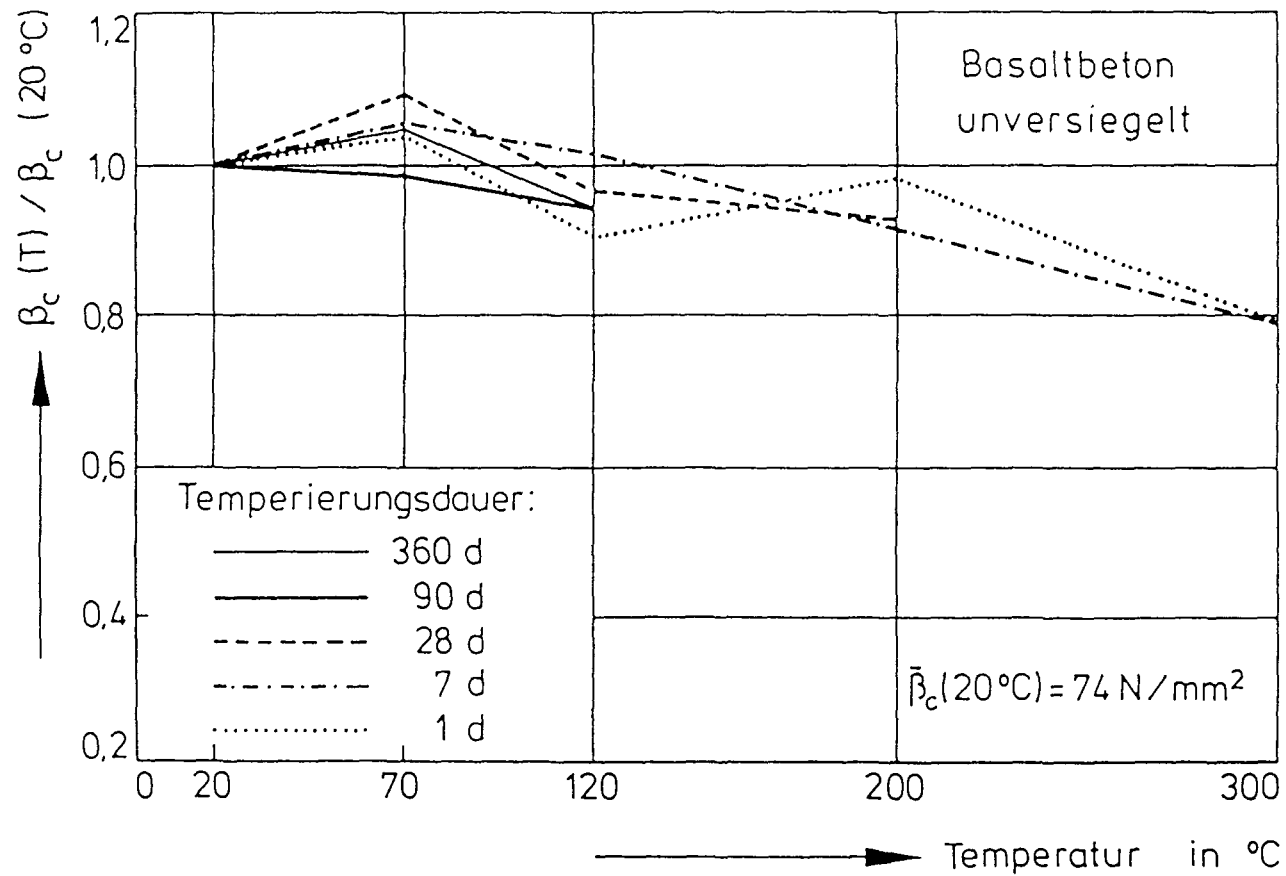


Bild 3: Restfestigkeit von unversiegelten Basaltbetonproben, die mechanisch unbelastet einer Dauertemperaturbeanspruchung unterworfen waren

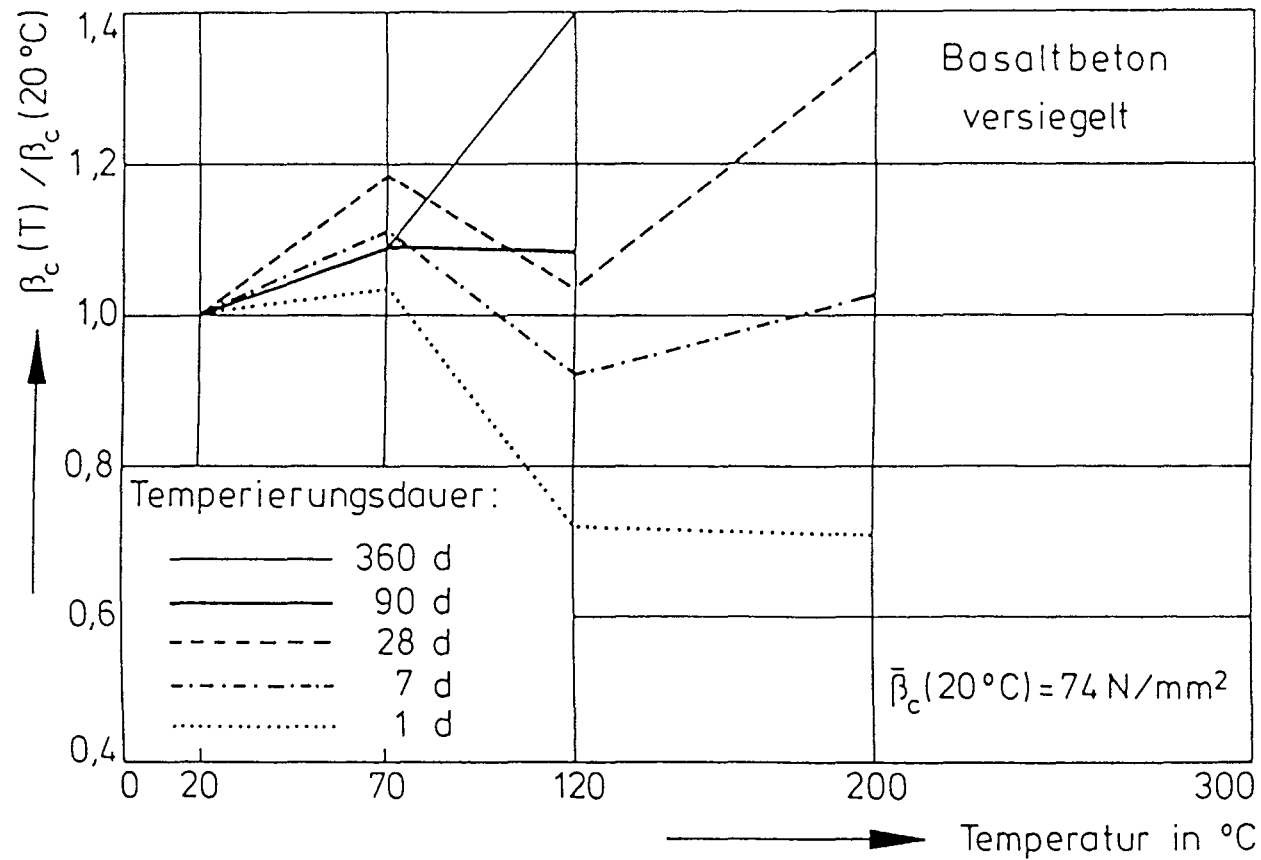


Bild 4: Restfestigkeit von versiegelten Basaltbetonproben, die mechanisch unbelastet einer Dauertemperaturbeanspruchung unterworfen waren

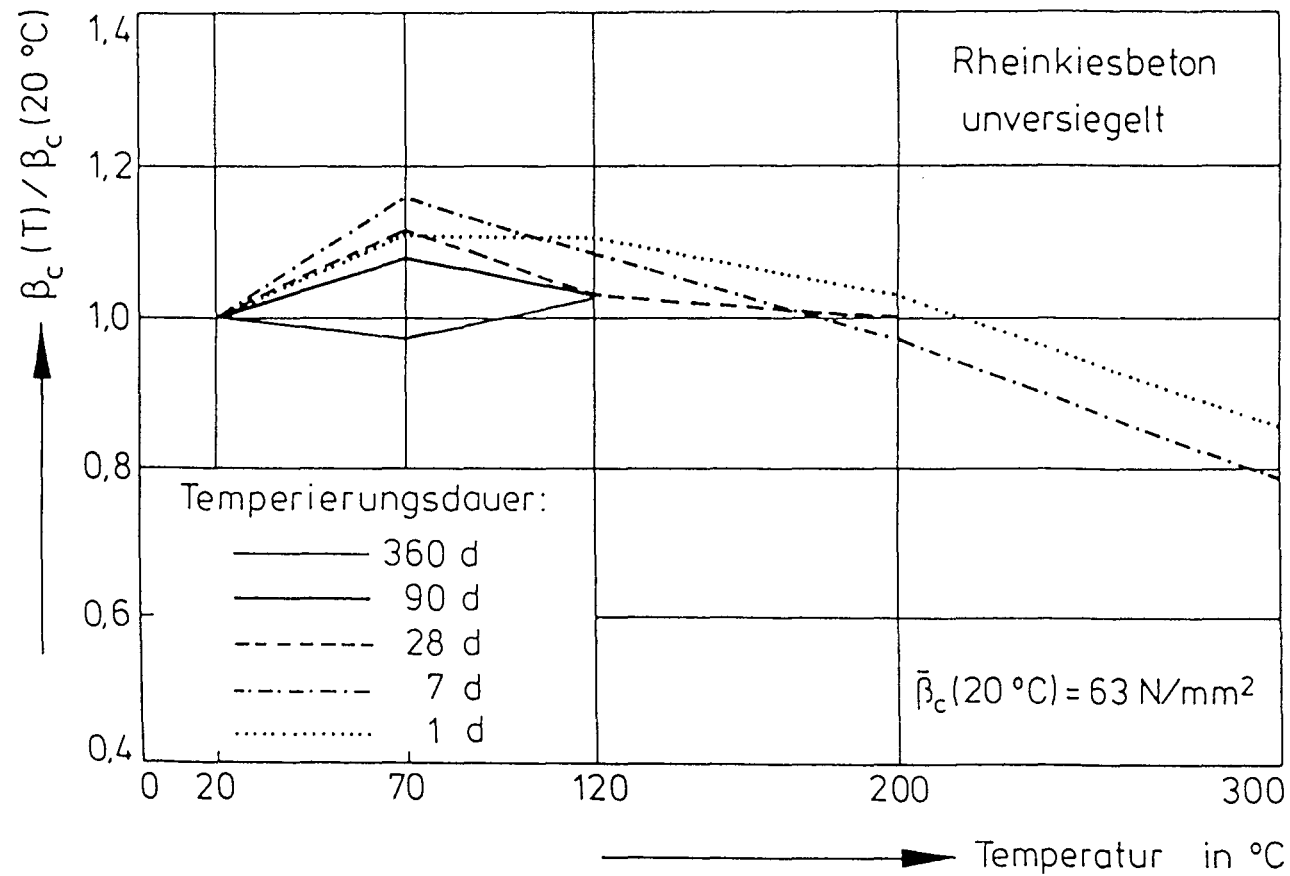


Bild 5: Restfestigkeit von unversiegelten Rheinkiesbetonproben, die mechanisch unbelastet einer Dauertemperaturbeanspruchung unterworfen waren

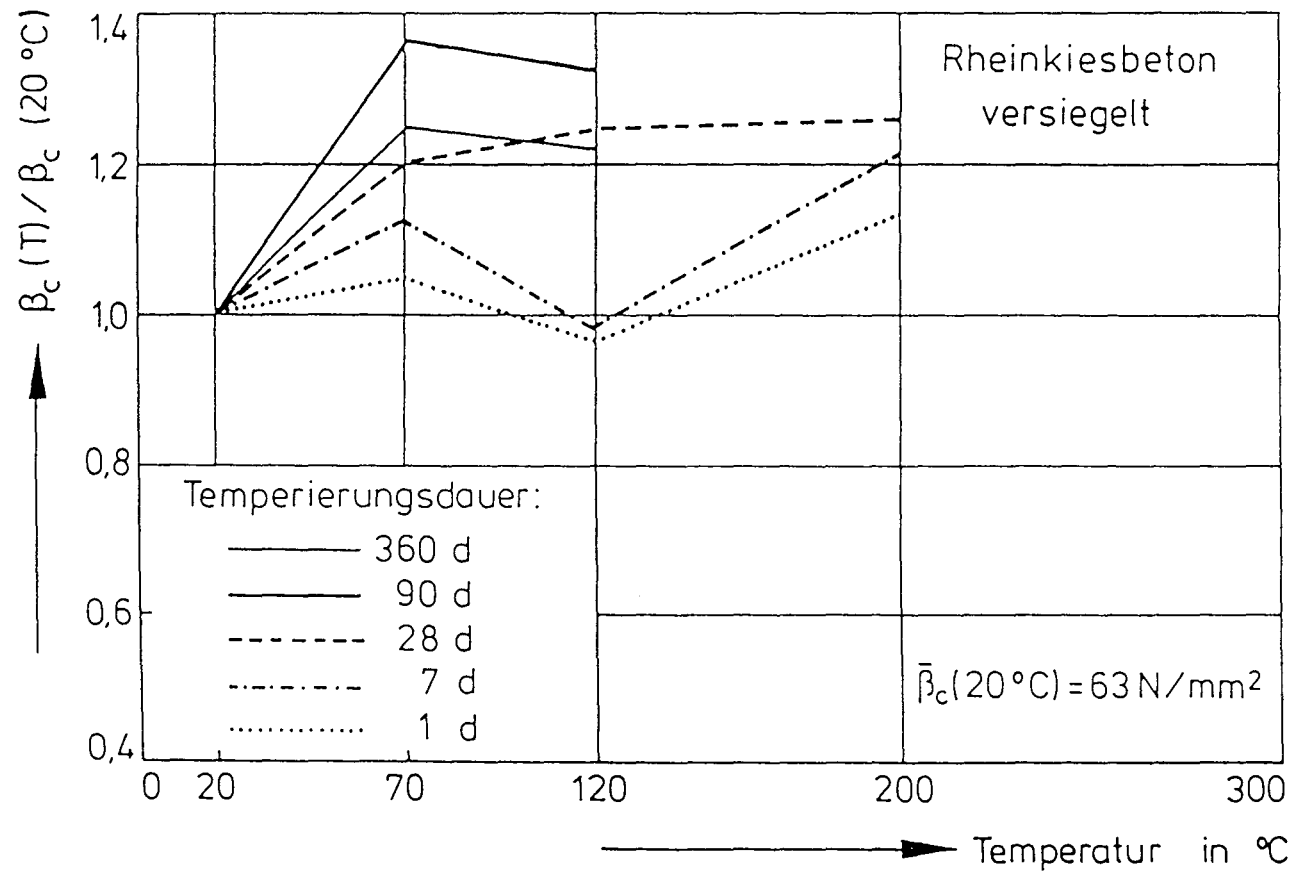


Bild 6: Restfestigkeit von versiegelten Rheinkiesbetonproben, die mechanisch unbelastet einer Dauertemperaturbeanspruchung unterworfen waren

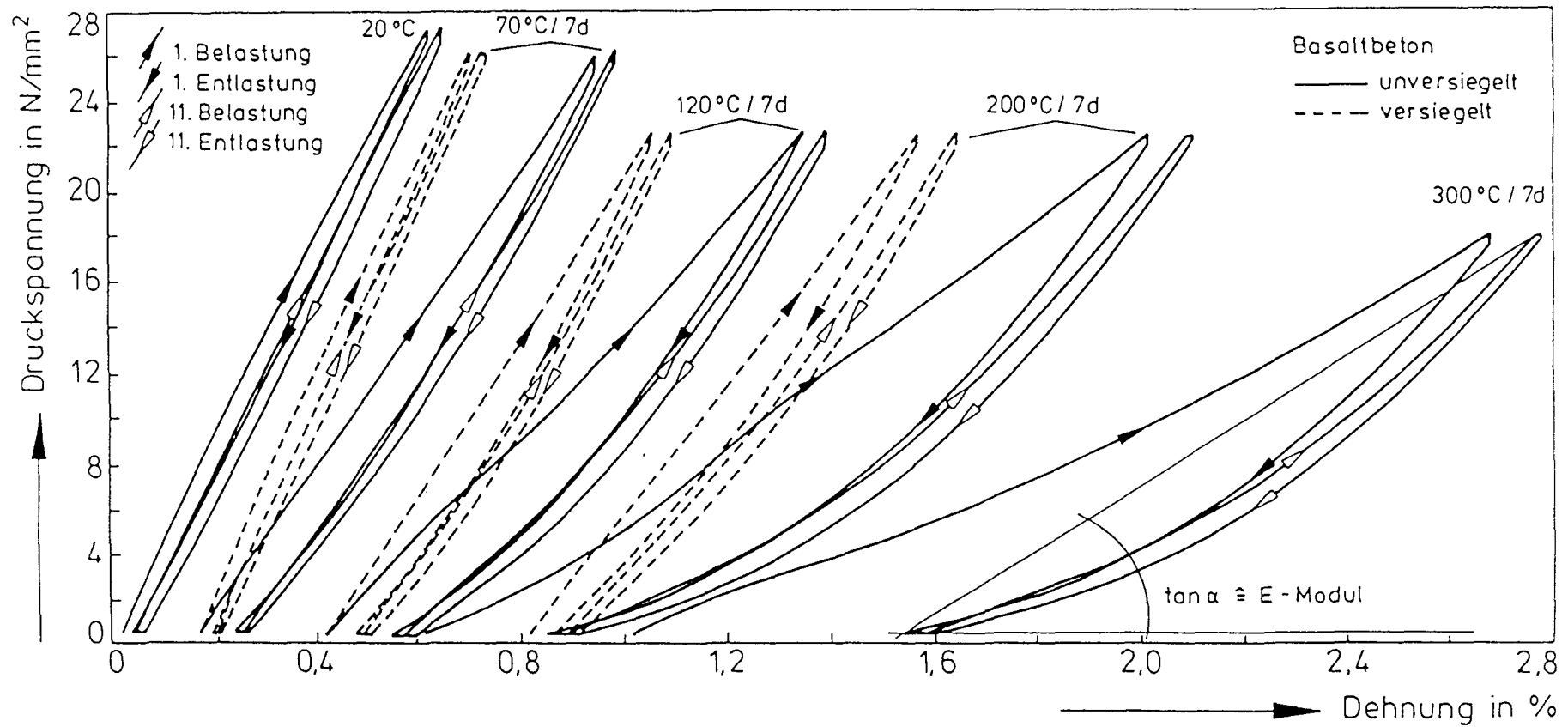


Bild 7: σ - ϵ -Verläufe von versiegelten und unversiegelten Basaltbetonproben, die einer siebentägigen Dauertemperaturbeanspruchung unterworfen waren

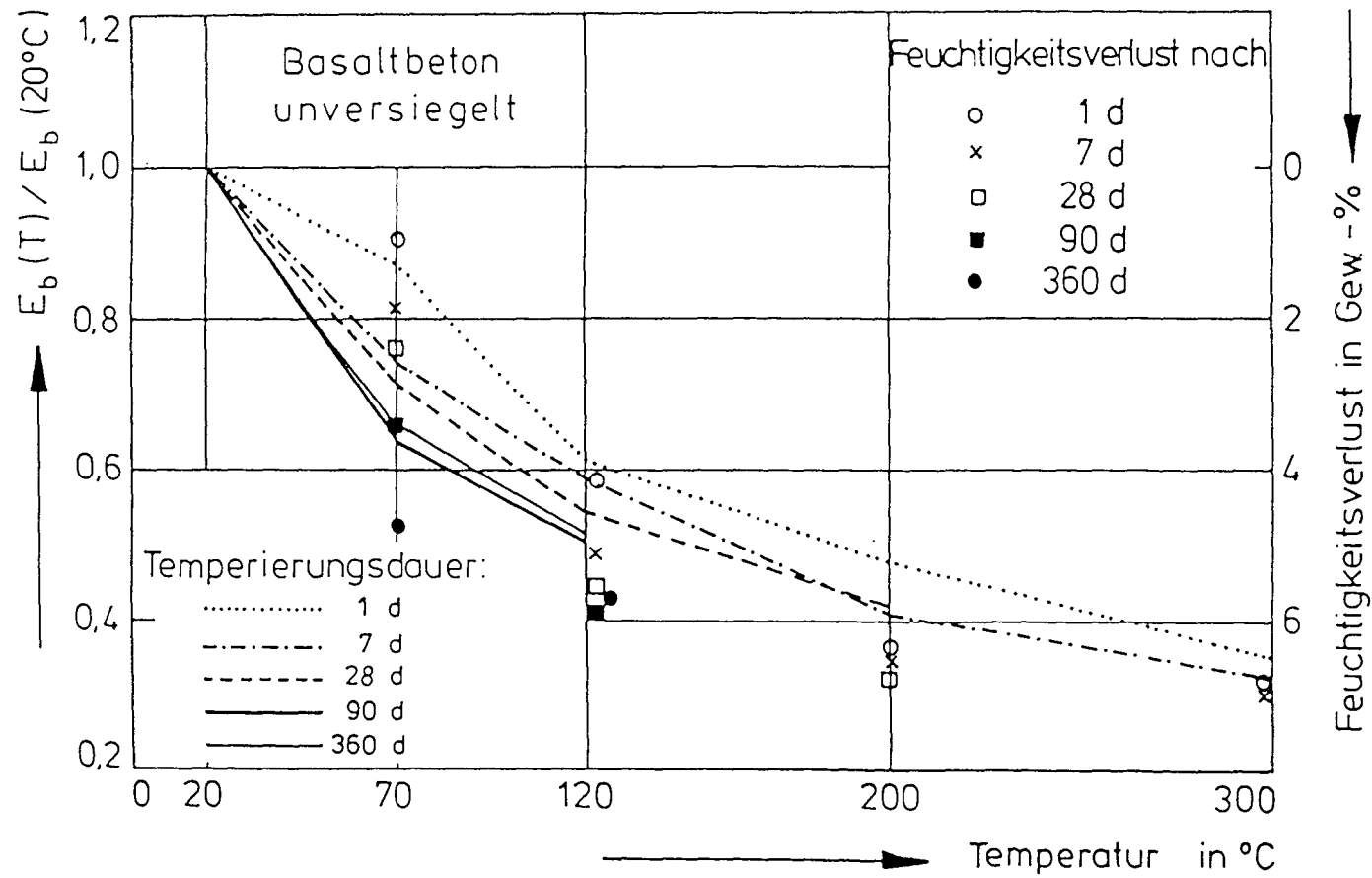


Bild 8: E-Moduln von unversiegelten Basaltbetonproben, die mechanisch unbelastet einer Dauertemperaturbeanspruchung unterworfen waren

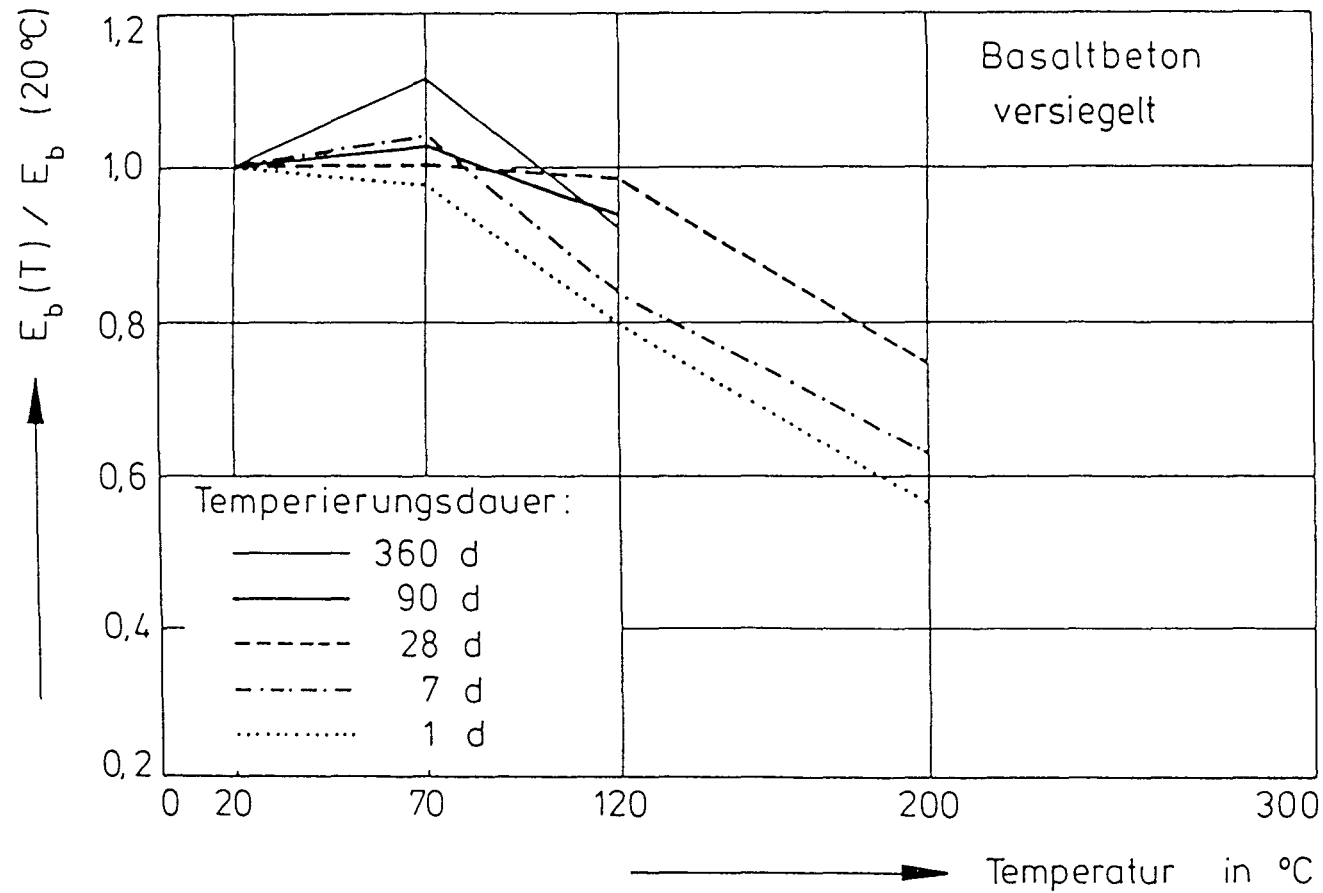


Bild 9: E-Moduln von versiegelten Basaltbetonproben, die mechanisch unbelastet einer Dauertemperaturbeanspruchung unterworfen waren

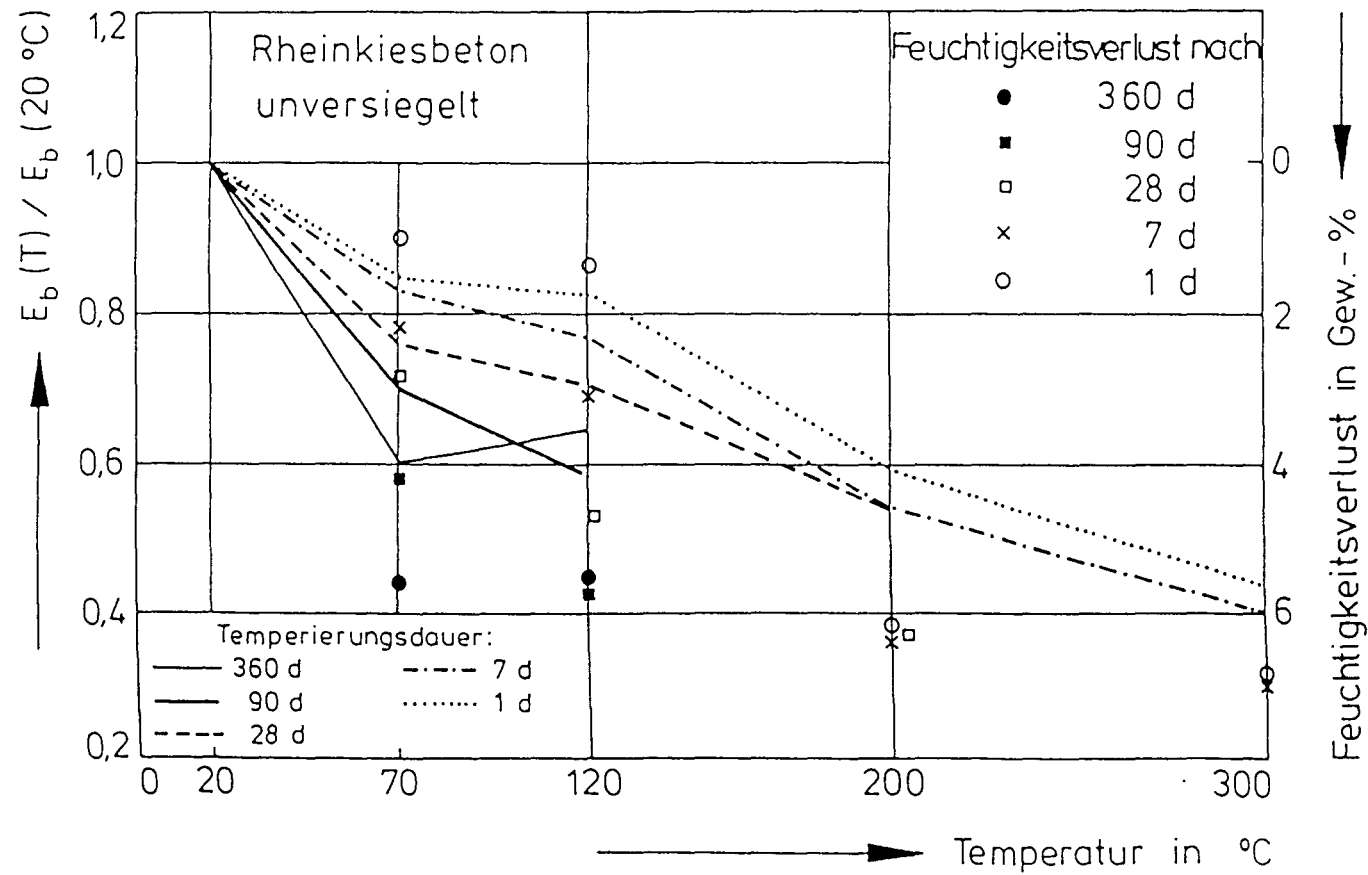


Bild 10: E-Moduln und Feuchtigkeitsverlust von unversiegelten Rheinkiesbetonproben, die mechanisch unbelastet einer Dauertemperaturbeanspruchung unterworfen waren

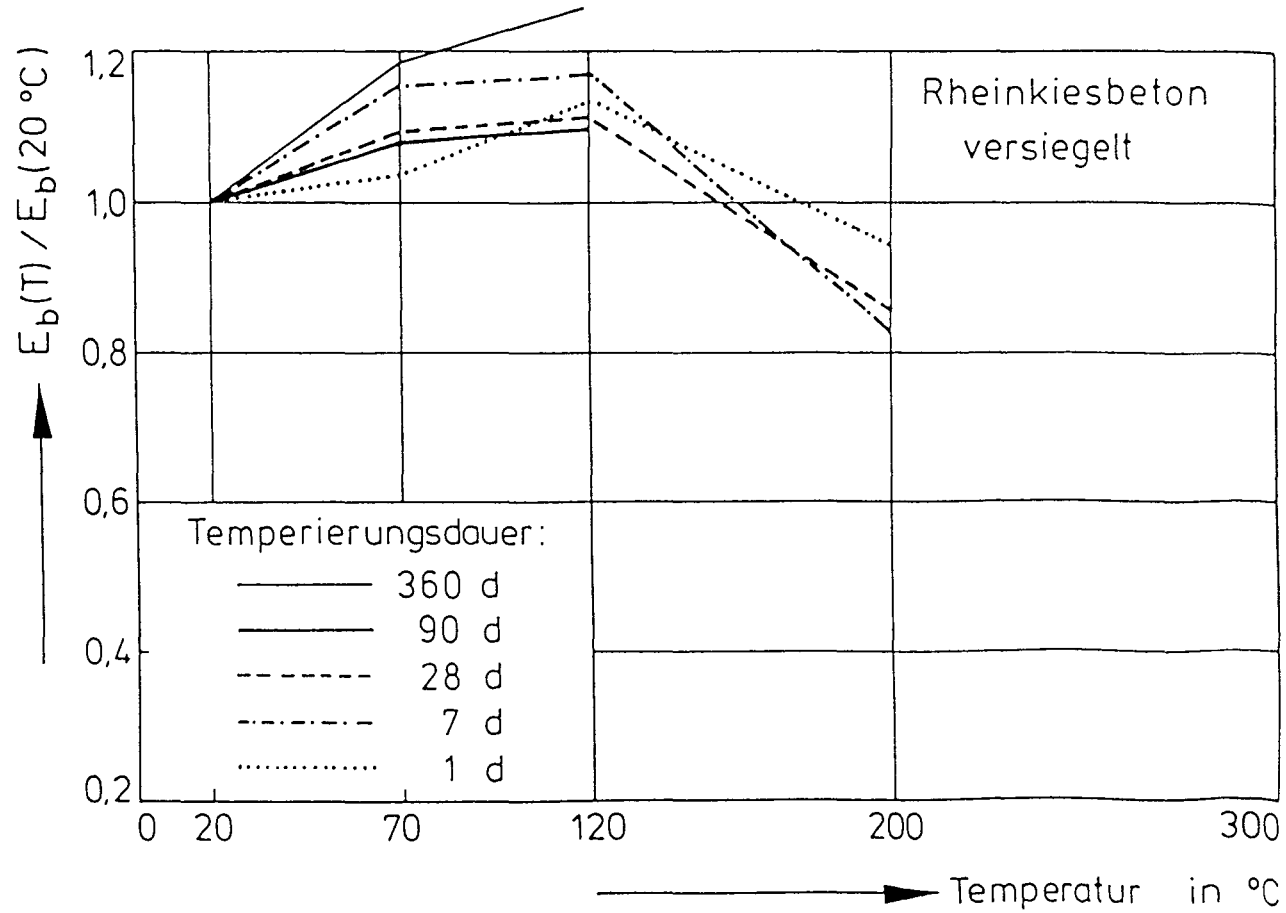


Bild 11: E-Moduln von versiegelten Rheinkiesbetonproben, die mechanisch unbelastet einer Dauertemperaturbeanspruchung unterworfen waren